ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ДДАЕУ

Півоваров О.А.
Ковальова О.С.
Тертишний О.О.
Кошулько В.С.

Інноваційні технології у виробництві цукристих речовин та продуктів харчування

Навчальний
посібник

2026

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

ПІВОВАРОВ О. А., КОВАЛЬОВА О. С., ТЕРТИШНИЙ О. О., КОШУЛЬКО В. С.

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ВИРОБНИЦТВІ ЦУКРИСТИХ РЕЧОВИН ТА ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ

Навчальний посібник



Дніпро 2026

УДК 664(075.8)
П 32
Рекомендовано до друку вченою радою Дніпровського державного аграрно-економічного університету
протокол № 7 від 26 березня 2026 р.

Рецензенти:

Батраченко Олександр Вікторович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри харчових технологій Черкаського державного технологічного університету;
Алієв Ельчин Бахтияр огли – доктор технічних наук, старший дослідник, професор кафедри інжинірингу технічних систем Дніпровського державного аграрно-економічного університету;
Мацук Юлія Анатоліївна – кандидатка технічних наук, доцентка, доцентка кафедри харчових технологій Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара.

Півоваров О. А., Ковальова О. С., Тертишний О. О., Кошулько В. С. Інноваційні технології у виробництві цукристих речовин та продуктів харчування: Навчальний посібник. Дніпро: ДДАЕУ, 2026. 622 с.
ISBN 978-617-95219-7-3

Навчальний посібник присвячений вивченню особливостей та сучасних інновацій у технологіях виробництва цукру, крохмалю, пектину та пектинових речовин, меду, камедей, полісахаридів, целюлози та їх похідних різного походження. У ньому детально розглядаються сучасні методи обробки та переробки сировини, а також застосування сучасного обладнання, що забезпечує високу ефективність, безпечність та якість виробництва харчових продуктів. Окрема увага приділяється технологічним новинкам, що дозволяють оптимізувати процеси та впроваджувати інноваційні рішення у харчовій промисловості.

Посібник призначено для здобувачів вищої освіти, які навчаються за ОПП Харчові технології за спеціальністю G13 Харчові технології першого (бакалаврського) і другого (магістерського) рівнів вищої освіти, а також для наукових працівників, аспірантів і фахівців, які цікавляться проблемами інноваційного інжинірингу харчових виробництв.

ISBN 978-617-95219-7-3

©Півоваров О. А , Ковальова О. С., Тертишний О. О., Кошулько В. С., 2026

ПРИСВЯЧУЄТЬСЯ СВІТЛІЙ ПАМ'ЯТІ ТА ЖИТТЄВОМУ ПОДВИГУ



ПРОФЕСОРА ПІВОВАРОВА ОЛЕКСАНДРА АНДРІЙОВИЧА

За багатогранний внесок у розвиток харчових та хімічних технологій, за створення наукової школи, що стала гордістю України, та за невтомну працю на ниві просвітництва. Видатному вченому, чиє ім'я стало синонімом інноваційного поступу вітчизняної харчової науки. Архітектору сучасної вищої школи, чий педагогічний геній сформував цілі покоління наукової еліти та професійних лідерів. Людині великої душі та високої науки, чия професійна стежка стала дороговказом для тисяч учнів.

Ваша діяльність – це не просто літопис наукових відкриттів, а створення унікальної інтелектуальної екосистеми, де гартувалися характер, принциповість та віра у велич людського розуму. Ви довели, що справжня наука не має кордонів, а справжній вчений – це передусім Людина високої культури.

Ця книга, ідейним натхненником і творцем якої Ви були, лише скромна частина того великого спадку, який Ви плекали десятиліттями. Вона буде даниною глибокої шани Вашій багатогранній діяльності, де глибокий інтелект завжди поєднувався з непохитними етичними стандартами, сміливими новаторськими підходами, відданістю науковій істині.

Видатному Вченому і Наставнику – з безмежною повагою та щирою вдячністю за світло знань.

ЗМІСТ

ВСТУП		11
Розділ 1. ВИДИ І КЛАСИФІКАЦІЯ ЦУКРУ		15
1.1.	Характеристика цукру	15
1.2.	Особливості виробництва готової продукції	19
1.3.	Характеристика властивостей цукровмісної сировини	24
1.4.	Види цукру	34
1.5.	Найпоширеніші видів цукру та їх використання	37
1.5.1.	Види білого цукру	38
1.5.2.	Види коричневого цукру	39
1.5.3.	Цукровий пісок	43
1.6.	Види тростинного цукру	43
1.7.	Класифікація цукру за допомогою цифрових зображень і методів розпізнавання образів	46
1.8.	Функціональні властивості цукру	49
Питання для самоконтролю		53
Рекомендована навчальна література		54
Розділ 2. ІННОВАЦІЇ У ВИРОБНИЦТВІ ЦУКРОВОЇ ПУДРИ, РІДКОГО ЦУКРУ, РОЗЧИНЕНИХ ЦУКРОВИХ ПОРОШКІВ		55
2.1.	Відомості про цукрову пудру	55
2.2.	Історія та передумови появи цукрової пудри	56
2.3.	Особливості помелу цукру	57
2.4.	Рідкий цукор	60
2.5.	Розчинний порошок фінікового цукру	65
2.6.	Виробництво порошку цукрового буряка	70
Питання для самоконтролю		72
Рекомендована навчальна література		73
Розділ 3. ЦУКРОВИЙ ПИЛ ЯК ПОТЕНЦІЙНА ЗАГРОЗА БЕЗПЕЦІ ЦУКРОВОГО ВИРОБНИЦТВА		74
3.1.	Властивості цукрового пилу	74
3.2.	Негативний вплив цукрового пилу	78
3.3.	Інноваційні ініціативи в цукровій промисловості щодо управління цукровим пилом	80
3.4.	Новітні технології та додаткові заходи	83
Питання для самоконтролю		92
Рекомендована навчальна література		93
Розділ 4. ОСОБЛИВІСТЬ ІННОВАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЦУКРУ		94
4.1.	Розгортання найсучаснішого обладнання	94
4.2.	Фактори, які враховують при прийнятті рішень щодо обладнання	95
4.3.	Обладнання для миття цукрових буряків	99

4.4. Машина для миття овочів MB, Pro-Vega 101
4.5. Обладнання для одержання бурякової стружки 103
4.6. Фугування утфелю. Сепаратори 107
4.7. Фільтраційне обладнання 113
4.8. Нетканинний роторний вакуумний фільтр 114
4.9. Випарні станції 116
4.10. Стандартна галузева технологія кристалізації цукру 118
4.11. Вертикальні кристалізатори з охолодженням: мінімізація чистоти меляси, підвищення продуктивності та доходу 120
4.12. Короткий огляд цукрових центрифуг 122
4.13. Обладнання для центрифугування високоякісного утфелю 125
4.14. Інноваційне обладнання для сушіння кристалів цукру 126
Питання для самоконтролю 130
Рекомендована навчальна література 132
Розділ 5. ПЕРЕРОБКА ТА ПОВТОРНЕ ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ ЦУКРОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ДЛЯ ОТРИМАННЯ РІЗНИХ ПРОДУКТІВ 133
5.1. Відходи цукрового виробництва і їх використання на практиці 133
5.2. Перетворення відходів цукрового виробництва на біоенергію 135
5.3. Стічні води сільськогосподарського сектору та промисловості 136
5.4. Виробництво біометану та H_2 палива зі стічних вод цукрової промисловості (останні дослідження та інновації) 144
5.5. Передові технології перетворення стічних вод цукрової промисловості в енергію 148
5.6. Продукти, отримані зі сміття цукрової тростини та багаси 152
5.6.1. Хімічні речовини та паливо 154
5.6.2. Продукти, отримані зі спаленої золи 157
5.6.3. Інші продукти, отримані із золи жому 159
5.6.4. Вироби з пресового шламу 161
5.6.5. Інші застосування пресового шламу цукрової тростини 164
5.7. Тверді відходи та побічні продукти 167
Питання для самоконтролю 169
Рекомендована навчальна література 170
Розділ 6. ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ ВИРОБНИЦТВА МЕДУ 171
6.1. Класифікація меду 171
6.2. Різновиди сирого меду 192
6.3. Важливість бджіл 193
6.4. Використання розумних вуликів у виробництві меду 196
6.5. Автоматизація медозбору 198
6.6. Методи точного запилення 199
6.7. Аналіз даних в управлінні вуликами 201
6.8. Сталий розвиток виробництва меду 202
6.9. Методи управління заради максимізації виробництво меду 206
6.10. Збільшення виробництва меду 208

6.11. Ефективне управління бджолиним середовищем та ресурсами 209
6.12. Сучасні методи виробництва меду 211
6.13. Вплив зміни клімату на бджільництво 213
6.14. Мед в харчовій галузі, його роль та значення 218
6.15. Сучасні технології переробки меду 221
Питання для самоконтролю 223
Рекомендована навчальна література 224
Розділ 7. ПІДСОЛОЖУВАЧІ 225
7.1. Використання підсолоджувачів у харчовій промисловості 225
7.2. Класифікація підсолоджувачів 228
7.2.1. Класифікація за солодкістю 230
7.2.2. Класифікація за харчовою цінністю 231
7.3. Харчові, нехарчові та традиційні підсолоджувачі 241
7.4. Синтетичні підсолоджувачі 242
7.5. Харчові натуральні замінники 247
7.6. Нехарчові, натуральні підсолоджувачі 248
7.7. Харчове застосування фініків як підсолоджувача 250
7.8. Перспективи застосування підсолоджувачів у харчовій промисловості: майбутні тенденції та інновації 253
Питання для самоконтролю 255
Рекомендована навчальна література 257
Розділ 8. ПРИРОДНІ ПОЛІСАХАРИДИ: ДЖЕРЕЛА, ХАРАКТЕРИСТИКИ, ВЛАСТИВОСТІ, ХАРЧОВІ ТА ФАРМАЦЕВТИЧНІ ЗАСТОСУВАННЯ 258
8.1. Композитні матеріали на основі природних полісахаридів 258
8.2. Класифікація природних полісахаридів 261
8.3. Переробка та характеристика природних полімерів 267
8.4. Техніка обробки 269
8.5. Природні полімери як альтернатива нафтовим матеріалам 273
8.6. Екстракція, очищення та модифікація целюлози 274
8.6.1. Екстракція целюлози 275
8.6.2. Модифікація целюлози 277
8.7. Екстракція, очищення та модифікація крохмалю 277
8.7.1. Методи екстракції крохмалю 278
8.7.2. Модифікація крохмалю 280
8.8. Біологічне застосування природних полімерів 280
8.8.1. Протизапальна активність 281
8.8.2. Антикоагулянтна активність 283
8.8.3. Противірусна активність 284
8.9. Застосування природних полімерів у харчових продуктах 284
8.10. Регуляторні аспекти 287
8.11. Фармацевтичне застосування природних полімерів 288
8.11.1. Трансдермальна доставка ліків 289
8.11.2. Природні полімерні імплантати 290

8.12. Вплив природних полімерів на навколишнє середовище 291
8.13. Перехід від нафтохімії до біоекономіки 292
8.14. Відновлювані полімери 294
8.15. Полімолочна кислота 295
8.16. Біо-поліетилен 296
8.17. Альгінати 297
8.18. Економічний вплив природних полімерів 298
8.19. Деякі важливі природні полімери для економіки 300
8.20. Промислове використання природних біорозкладаних полімерів 301
8.21. Майбутні перспективи 303
8.21.1. Природні полімерні основи для харчових продуктів 304
8.21.2. Тенденції та перспективи розвитку натуральних полімерів у косметичній промисловості 305
Питання для самоконтролю 310
Рекомендована навчальна література 311
Розділ 9. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА КРОХМАЛЮ 313
9.1. Крохмаль як представник вуглеводів 313
9.2. Класифікація крохмалю 314
9.3. Безвідходні технології крохмалю 317
9.4. Досягнення в нанокомпозитах на основі крохмалю для функціональних харчових систем 319
9.5. Інноваційні методи виготовлення нанокомпозитів на основі крохмалю 321
9.6. Промислове виробництво однониткових наночастинок 322
9.7. Механістичне розуміння біоактивності однонуклеотидних клітин нанокомпозитів на основі крохмалю 322
9.8. 3D-друк з натуральним крохмалем 323
9.9. Мікро- та наноінкапсуляційні властивості крохмалю 325
9.10. Крохмаль для біорозкладних плівок, композитних плівок на основі наночастинок та їх застосування в харчових продуктах 325
9.11. Інноваційне обладнання, яке застосовують на заводах по виробництву крохмалю 327
9.11.1. Штифтовий млин 327
9.11.2. Відцентровий сепаратор 329
9.11.3. Гвинтовий прес 331
9.11.4. Трубчаста сушарка 332
9.11.5. Млин для видалення зародків 334
9.11.6. Промивний циклон 336
9.11.7. Флеш-сушарка 337
9.11.8. Модифікований крохмалеварний апарат 339
9.11.9. Іонообмінна колона 340

Питання для самоконтролю 342
Рекомендована навчальна література 342
Розділ 10. ОСТАННІ ДОСЯГНЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ КРОХМАЛЮ ДЛЯ РІЗНОМАНІТНИХ ВИДІВ УПАКОВКИ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ 344
10.1. Мікроструктури крохмалю та фазові переходи 344
10.2. Екструзійна обробка крохмалю 348
10.3. Покращення продуктивності та зменшення витрат 350
10.3.1. Армування натуральними наповнювачами 351
10.3.2. Нанокомпозити на основі крохмалю 353
10.3.3. Самоармовані композити 354
10.3.4. Змішування з іншими природними полімерами 355
10.3.5. Функціоналізовані композити 357
10.4. Зниження чутливості до вологи 358
10.5. Піноутворення на основі крохмалю 360
10.6. Інтелектуальна пакувальні плівкові матеріали на основі крохмалю 364
10.6.1. Біорозкладна упаковка 364
10.6.2. Біорозкладні плівкові матеріали на основі крохмалю 367
10.7. Механічні властивості плівок на основі крохмалю 370
10.8. Гідрофобні та бар'єрні властивості плівок на основі крохмалю 372
10.8.1. Пароізоляція 372
10.8.2. Кисневий бар'єр 374
10.9. Активні плівки на основі крохмалю 375
10.9.1. Плівки на основі крохмалю з антиоксидантно активним складом 376
10.9.2. Антибактеріальні плівки на основі активного крохмалю 379
10.9.3. Активні плівки на основі крохмалю з контрольованим вивільненням 381
10.10. Інтелектуальні плівки на основі крохмалю 383
10.10.1. Індикатор свіжості 385
10.10.2. Датчик часу-температури 387
10.11. Застосування активних та інтелектуальних плівок на основі крохмалю в харчовій промисловості 389
10.11.1. Активна упаковка 389
10.12. Перспективи на майбутнє 392
Питання для самоконтролю 394
Рекомендована навчальна література 395
Розділ 11. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕКТИНУ 397
11.1. Коротко про пектин, його класифікація і властивості 397
11.2. Основна структура пектину 400
11.3. Ланцюги пектину 401
11.4. Види пектину 403
11.5. Джерела пектину 406

11.6. Екстракція пектину 409
11.7. Інноваційні методи екстракції пектину 411
11.8. Мікрохвильова екстракція (MAE) для пектину 411
11.9. Ферментна екстракція (EAE) для пектину 413
11.10. Ультразвукова екстракція (УЕ) для пектину 414
11.11. Екстракція пектину за допомогою діелектричного бар'єрного розряду 415
11.12. Підкритична водна екстракція для пектину 415
11.13. Омічна екстракція для пектину 417
11.14. Екстракція пектину помірним електричним полем 417
11.15. Екстракція пектину методом обробки під високим тиском 418
11.16. Проблеми екстракції пектину в промислових масштабах 422
11.17. Взаємодія пектину 427
11.17.1. Розчинність та диспергованість 427
11.17.2. Гелеутворення 428
11.17.3 Розщеплення пектину 429
11.18. Потенційне застосування пектину 430
11.18.1. Пектинові гідроколоїди у харчовій промисловості 431
11.19. Охорона здоров'я та фармацевтика 434
11.19.1. Зниження концентрації ЛПНЩ у плазмі 434
11.19.2. Антиоксидантна активність 435
11.19.3. Терапевтичне та фармацевтичне використання 435
11.19.4. Глікемічний контроль 436
11.19.5. Пектин як інкапсулюючий агент 437
11.19.6. Зв'язувальні властивості металу 438
11.20. Упаковка харчових продуктів 438
11.20.1. Пакувальна плівка 439
11.20.2. Матеріал покриття 441
11.21. Перспективи на майбутнє 441
11.21.1. Перспективи використання пектину в харчовій промисловості 443
11.21.2. Розширення асортименту функціональних продуктів із використанням пектину 446
Питання для самоконтролю 450
Рекомендована навчальна література 451
Розділ 12. ПОЛІСАХАРИДИ З МОРСЬКИХ ВОДОРОСТЕЙ 452
12.1. Види морських водоростей 452
12.2. Продовольча безпека: морські водорості як харчовий ресурс 455
12.3. Здоров'я та благополуччя: біологічна користь морських водоростей для людини та тварин 458
12.4. Екосистемні функції 459
12.5. Біоенергія 460
12.6. Процеси екстракції гідроколоїдів морських водоростей 461
12.6.1. Попередня обробка морських водоростей 464
12.7. Нові методи екстракції 466

12.7.1. Мікрохвильова екстракція (МАЕ) 468
12.7.2. Ультразвукова екстракція (УАЕ) 470
12.7.3. Технологія високого тиску 472
12.7.4. Ензимно-асистована екстракція (ЕАЕ) 473
12.7.5. Сталий видобуток полісахаридів морських водоростей з використанням іонних розчинників 475
12.7.6. Модифікація полісахаридів морських водоростей в іонному розчиннику 477
12.8. Традиційні методи екстракції проти альтернативних методів екстракції 478
Питання для самоконтролю 480
Рекомендована навчальна література 481
Розділ 13. КАМЕДІ, ОТРИМАНІ З РОСЛИННИХ ТА МІКРОБНИХ ДЖЕРЕЛ 482
13.1. Їстівні камеді, класифікація 482
13.2. Камеді рослинного походження 488
13.3. Їстівні камеді з морських водоростей 495
13.4. Їстівні камеді з мікробних джерел 498
13.5. Їстівні камеді тваринного походження 501
13.6. Харчова цінність їстівних камедей 502
13.7. Функціональних характеристик їстівних камедей 504
13.8. Застосування їстівних камедей у різних харчових секторах 507
13.8.1. Хлібопекарська промисловість 508
13.8.2. Кондитерська промисловість 509
13.8.3. Застосування їстівних камедей у молочних продуктах 510
13.8.4. Застосування їстівних камедей у м'ясних та рибних продуктах 513
13.8.5. Виробництво напоїв з додаванням камедей 513
13.8.6. Використання камедей при виробництві заморожених продуктів 515
13.9. Проблеми у застосуванні їстівних камедей 516
13.10. Аспекти безпеки та регуляторного забезпечення 517
13.11. Інновації у використанні камедей 519
Питання для самоконтролю 521
Рекомендована навчальна література 522
Розділ 14. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ЦЕЛЮЛОЗИ ТА ЇЇ ПОХІДНИХ 523
14.1. Види та класифікація целюлози 523
14.2. Модифікація структури целюлози 527
14.3. Функції целюлози та її похідних у харчових системах 531
14.4. Інновації застосування целюлози в харчовій промисловості 533
14.5. Розробка розумних пакувальних матеріалів на основі наноцелюлози 536
14.6. Бактеріальна целюлоза 538
14.7. Порошкоподібна целюлоза 543

14.7.1. Інноваційне використання порошкоподібної мікроцелюлози в промисловості 545
14.8. Целюлозні аерогелі 547
14.9. Особливості целюлозних аерогелів 551
14.9.1. Особливості процесу екстракції целюлози 551
14.9.2. Властивості та класифікація целюлозних аерогелів 554
14.9.3. Синтез целюлозних аерогелів 556
14.9.4. Фактори, що впливають на властивості та структуру целюлозних аерогелів 559
14.9.5. Целюлозні аерогелі з побічних продуктів харчової промисловості 561
14.9.6. Екологічні та економічні переваги використання побічних продуктів харчової промисловості для виробництва целюлозних аерогелів 565
14.10. Емульсії на основі целюлози 569
14.10.1. Методи приготування емульсій на основі целюлози 571
14.11. Нанокристали целюлози 572
14.11.1. Нанокристали целюлози в упаковці харчових продуктів 574
14.11.2. Нанокристали целюлози у системах доставки їжі 577
14.11.3. Нанокристали целюлози як харчова добавка 579
14.11.4. Наноцелюлоза в продуктах харчування 582
14.11.5. Наноцелюлоза як армуючий матеріал 586
Питання для самоконтролю 587
Рекомендована навчальна література 588
Розділ 15. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІСАХАРИДІВ ТВАРИННОГО ПОХОДЖЕННЯ 589
15.1. Види та класифікація полісахаридів тваринного походження 589
15.2. Технологічні особливості виробництва полісахаридів тваринного походження 593
15.3. Використання полісахаридів тваринного походження в харчовій індустрії 597
Питання для самоконтролю 601
Рекомендована навчальна література 602
ВИСНОВКИ 603
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА 605

ВСТУП

Навчальний посібник присвячений одній із найважливіших і надзвичайно динамічних галузей харчової промисловості – технологіям виробництва цукристих продуктів, а також сучасному обладнанню, яке забезпечує ефективність, якість та інноваційність виробничих процесів. Цукристі продукти є невід'ємною частиною харчування людини, вони забезпечують організм необхідною енергією, підтримують фізичну та розумову працездатність, сприяють підтриманню здоров'я та довголіття. Без цукристих продуктів сучасне харчування було б неповноцінним, а виробництво кондитерських виробів, напоїв, медових сумішей та інших харчових продуктів функціонального призначення було б неможливим.

Різноманіття цукристих речовин на ринку та їх широке застосування у харчовій промисловості зумовлює потребу у постійному вдосконаленні технологічних процесів. Сучасне виробництво вимагає не лише впровадження нових технологій, а й модернізації існуючих виробничих процесів із забезпеченням високої продуктивності, економії сировини та енергії, а також дотримання вимог санітарії, екології та безпеки праці. Важливим аспектом є також автоматизація та роботизація технологічних операцій, що дозволяє значно підвищити ефективність виробництва, зменшити вплив людського фактору на якість продукту та забезпечити стабільність технологічних процесів.

Цукристі речовини – це органічні сполуки, у хімічній структурі яких переважають моносахариди, такі як глюкоза та фруктоза, а також інші прості цукри. До цукристих продуктів на харчових виробництвах відносять різні види цукру (глюкозу, фруктозу, сахарозу), глюкозні сиропи, патоку, інвертні сиропи (штучний мед), натуральний мед, а також інші природні або синтетичні продукти подібного складу. Ці продукти виконують не лише підсолоджуючу функцію, а й впливають на текстуру, консистенцію, аромат, колір і харчову цінність кінцевих виробів.

Особлива увага у сучасному виробництві приділяється використанню інноваційного обладнання та передових технологій, які дозволяють контролювати фізико-хімічні процеси на всіх стадіях виробництва. До таких технологій відносять обробку високим тиском, ультразвукове та ультрафіолетове опромінення, хвильовий та електромагнітний нагрів, заморожування, радіаційну обробку, а також процеси фільтрації, ультрафільтрації та зворотного осмосу. Використання цих технологій дозволяє зберігати біологічно активні компоненти, покращувати смакові й органолептичні властивості продуктів, а також створювати нові функціональні продукти з підвищеною харчовою цінністю.

Навчальний посібник також звертає увагу на роль обладнання та технологічних рішень у забезпеченні високих стандартів безпеки та якості. Це включає сучасні конвеєрні системи, роботизовані лінії фасування та упаковки, автоматизований контроль за процесами, а також інтегровані системи моніторингу та управління виробництвом. Окремий розділ присвячено можливостям застосування нанотехнологій у цукровій промисловості, що відкриває перспективи створення унікальних продуктів та принципово нових технологічних процесів.

Таким чином, навчальний посібник покликаний надати читачеві комплексне уявлення про сучасні та перспективні технології цукристих продуктів, особливості їх виробництва, роль інноваційного обладнання та принципи забезпечення високої якості та безпеки продукції. Він стане корисним джерелом знань для студентів, фахівців і виробничників, які прагнуть опанувати сучасні методи та підходи у харчовій промисловості та сприяти розвитку інноваційного і екологічно відповідального виробництва.

Цукристі продукти займають важливе місце в харчовій промисловості та щоденному раціоні людини, виконуючи не лише енергетичну функцію, а й сприяючи покращенню органолептичних та функціональних властивостей харчових продуктів. Серед них – цукор, крохмаль, пектинові речовини, мед, камеді, полісахариди, целюлоза та їх похідні різного походження, які широко

застосовуються як у традиційному харчуванні, так і у виробництві продуктів спеціального, функціонального призначення.

У сучасних умовах ринок харчових продуктів потребує високої якості, стабільності та безпеки готової продукції. Це зумовлює впровадження інноваційних технологій на всіх етапах виробництва цукристих продуктів – від підготовки сировини та її очищення до механічної, термічної та фізико-хімічної обробки, а також зберігання, пакування та транспортування готової продукції.

Навчальний посібник «Інноваційні технології цукристих продуктів» має на меті ознайомити фахівців, студентів та науковців з сучасними технологічними підходами, методами контролю якості та новітнім обладнанням, що застосовується у виробництві цукристих продуктів. Особлива увага приділяється інноваційним процесам, які дозволяють підвищити ефективність виробництва, мінімізувати втрати сировини, покращити органолептичні властивості продуктів та забезпечити їх екологічну безпеку.

У книзі детально розглядаються технології виробництва цукру, крохмалю, пектину та його похідних, меду, камедей, полісахаридів та целюлози. Окремі розділи присвячені фізико-хімічним механізмам, що впливають на формування якості та стабільності продукту, а також на застосування сучасного обладнання – від традиційних переробних машин до автоматизованих та роботизованих систем для сортування, фасування та пакування.

Посібник також звертає увагу на сучасні тенденції у харчовій промисловості, такі як впровадження методів високого тиску, ультразвукової обробки, ультрафіолетового опромінення, застосування хвильового нагріву, електромагнітних коливань, радіаційного впливу та інноваційних фільтраційних технологій, включно з ультрафільтрацією та зворотним осмосом. Ці підходи дозволяють контролювати фізико-хімічні перетворення в сировині та створювати принципово нові продукти харчування, які відповідають вимогам функціонального та здорового харчування.

Навчальний посібник розрахований на студентів вищих навчальних закладів харчового профілю, інженерів-технологів, науковців та практиків

харчової промисловості. Його структурований виклад матеріалу, ілюстративні приклади сучасного обладнання та опис інноваційних процесів дають змогу сформувати системне розуміння технологій виробництва цукристих продуктів та орієнтири для впровадження новітніх рішень у практику з урахуванням екологічної безпеки, охорони праці та якості кінцевого продукту.

Посібник призначено для здобувачів вищої освіти, які навчаються за ОПП Харчові технології за спеціальністю G13 Харчові технології першого (бакалаврського) і другого (магістерського) рівнів вищої освіти. Він може бути корисним в процесі вивчення дисциплін «Інноваційний інжиніринг харчових виробництв», «Технологія цукристих речовин», «Мікробіота, пробіотики та пребіотики», «Біотехнологія харчових виробництв», «Технологія крохмалю», «Експертиза харчових продуктів» та багатьох інших. Також доцільно користуватись ним для роботи на аудиторних заняттях та для самостійної підготовки здобувачів денної і заочної форм навчання. Крім того, його доцільно використовувати для наукових працівників, аспірантів і фахівців, які цікавляться проблемами інноваційного інжинірингу харчових виробництв.

Автори виражають щиру подяку колегам та фахівцям у галузі харчових технологій за поради та рекомендації в процесі підготовки навчального посібника.

Розділ 1. ВИДИ І КЛАСИФІКАЦІЯ ЦУКРУ

1.1. Характеристика цукру

Цукор є майже чистою сахарозою ($C_{12}H_{22}O_{11}$) і відзначається приємним солодким смаком, а також високою біодоступністю, що забезпечує швидке поповнення енергетичних ресурсів організму. Сахароза належить до дисахаридів і під дією кислот або ферментів розщеплюється на глюкозу та фруктозу, утворюючи інвертний цукор, який широко застосовується у харчовій промисловості для регулювання текстури та вологоутримуючих властивостей продуктів.

Цукор може перебувати у двох фізичних формах: кристалічній та аморфній. За хімічною природою він проявляє властивості слабкої багатоосновної кислоти, здатної утворювати сполуки з оксидами лужних і лужноземельних металів – так звані сахарати. Інвертний цукор, завдяки високому вмісту фруктози, володіє гігроскопічними властивостями, що забезпечує його здатність запобігати зацукровуванню варення, уповільнювати черствіння хліба та зберігати вологість кондитерських виробів, таких як мармелад, пастила, зефір та помадка.

Розчинність сахарози у воді є високою і значно зростає з підвищенням температури. У водних розчинах цукор виступає як сильний дегідратант, що дозволяє утворювати пересичені розчини, кристалізація яких відбувається лише за наявності специфічних центрів кристалізації. Швидкість кристалізації залежить від температури, в’язкості розчину та ступеня пересичення.

У технологічних процесах харчової промисловості ці фізико-хімічні властивості сахарози та інвертного цукру активно використовуються. Наприклад, у виробництві кондитерських виробів вони забезпечують однорідність текстури та стабільність продукту, у хлібопекарстві – продовжують свіжість і підвищують об’єм хлібобулочних виробів, а у виробництві сиропів і напоїв – підтримують необхідну концентрацію розчину та контроль за в’язкістю. Таким чином, розуміння хімічних і фізичних властивостей цукру є ключовим для оптимізації технологічних процесів та отримання високоякісної продукції.

В якості вихідної сировини для виробництва цукру використовують цукровий буряк та цукрову тростину. Завдяки вищій врожайності цукрової тростини, порівняно з цукровим буряком, з одного гектара її посівів отримують приблизно вдвічі більше цукру, хоча вміст сахарози в стеблах тростини дещо нижчий, ніж у коренеплодах буряка.

Цукрова промисловість випускає кілька основних видів цукру. До них належить цукор-пісок – сипучий харчовий продукт білого кольору без грудок, із характерним солодким смаком без сторонніх присмаків та запахів. Його вологість не перевищує 0,14 %, вміст сахарози становить не менше 99,75 %, а металеві домішки – не більше 3 мг на 1 кг продукту; кристали мають розмір понад 0,3 мм.

Існує також рідкий цукор – харчовий продукт світло-жовтого кольору, солодкий на смак, без сторонніх присмаків і запахів. Для вищої категорії його вміст сахарози не менше 99,80 %, для першої категорії – не менше 99,5 %, а концентрація сухих речовин становить не менше 64 %.

Ще одним видом є цукор-рафінад – кусковий, пресований продукт, що включає рафінадний пісок та рафінадну пудру білого кольору. Він має солодкий смак, не містить сторонніх присмаків і запахів. Вміст сахарози у цукрі-рафінаді становить не менше 99,9 %, речовини, що редукують, – не більше 0,03 %, а вологість – до 0,2 %.

Цукор є одним із найважливіших компонентів харчового раціону і належить до групи вуглеводів. Вуглеводи поділяються на моносахариди (глюкоза, фруктоза, галактоза), дисахариди (сахароза, мальтоза, лактоза), перетравлювані полісахариди (крохмаль, глікоген) та неперетравлювані полісахариди (харчові волокна). Моносахариди та дисахариди мають солодкий смак, тому їх зазвичай називають цукрами.

Дисахариди та неперетравлювані полісахариди під час травлення розщеплюються на прості цукри – глюкозу та фруктозу. Сахароза легко і повністю засвоюється організмом людини та забезпечує швидке відновлення витраченої енергії.

При переробці цукрових буряків для харчових потреб отримують білий цукор-пісок, який містить не менше 99,75 % сахарози (у перерахунку на суху речовину) та має кольоровість трохи більше 0,8 умовних одиниць. Для промислового використання також виготовляють білий цукор-пісок із жовтуватим відтінком, що містить не менше 99,55 % сахарози та має кольоровість до 1,5 умовних одиниць.

Розмір кристалів цукру-піску варіюється від 0,2 до 2,5 мм. Якість продукту визначається відповідністю органолептичним, фізико-хімічним та мікробіологічним показникам, встановленим стандартами.

Цукор-пісок високо цінується через швидке та повне засвоєння організмом, що робить його незамінним джерелом енергії для людей, які виконують як фізичну, так і розумову працю.

Вітчизняна цукрова промисловість використовує цукровий буряк як основну сировину. Коренеплоди буряка збирають та доставляють на переробку, при цьому вони повинні відповідати стандартним вимогам щодо фізичного стану та допустимого вмісту коренеплодів із дефектами (підв'ялені, квітучі, пошкоджені тощо).

Якість технологічної сировини значною мірою залежить від технічної стиглості буряків під час збирання, ступеня їх забрудненості та основних хімічних показників, таких як вміст сахарози та чистота бурякового соку. Високі значення цих показників забезпечують ефективність технологічних процесів і дозволяють отримувати цукор високої якості.

Проте у буряків, що зберігаються у заготівельників, поступово погіршуються більшість показників якості. Це негативно впливає на ефективність переробки, підвищує втрати сахарози та знижує вихід і якість готової продукції. З цієї причини оптимальний період переробки цукрових буряків не повинен перевищувати 100 діб, щоб забезпечити максимальний вихід та якість цукру.

Основними напівфабрикатами цукробурякового виробництва є бурякова стружка, дифузійний сік, сироп, утфель та промитий цукор-пісок.

Бурякова стружка — це шматочки буряків певних розмірів і форми, які отримують шляхом нарізання коренеплодів у спеціальних бурякорізках.

Дифузійний сік представляє собою водний розчин сахарози та нецукрів, що витягуються з бурякової стружки методом дифузії.

Сироп — це насичений цукровий розчин, який утворюється після очищення соку та випарювання з нього води у випарних установках.

Утфель — це маса, що складається з кристалів сахарози та міжкристалевого розчину, яка утворюється під час уварювання сиропу у вакуум-апаратах.

Промисловий цукор-пісок отримують шляхом промивання утфелю гарячою водою, відокремлюючи кристали сахарози від міжкристалевого розчину (відтоків) під час центрифугування.

Поряд із основним продуктом – цукром-піском – під час переробки цукрових буряків утворюється значна кількість побічної продукції. При середньому виході цукру 10–12 % від маси перероблених буряків отримують приблизно:

80–83 % сирого бурякового жому – основний кормовий ресурс для тваринництва, а також сировина для виробництва пектину та біогазу;

5,0–5,5 % меляси – густий насичений розчин, який використовується у кондитерській промисловості, для виробництва спирту, кормів та ферментаційних процесів у мікробіологічному виробництві;

10–13 % фільтраційного осаду – також цінний ресурс, що застосовується у кормовиробництві, для добування пектинових речовин і у хімічній промисловості.

Ці побічні продукти є важливими вторинними ресурсами, ефективне використання яких підвищує економічну та екологічну ефективність цукрового виробництва, мінімізує відходи і сприяє комплексному застосуванню сировини.

1.2. Особливості виробництва готової продукції

Цукрові заводи традиційно розташовуються поблизу районів вирощування цукрових буряків, щоб мінімізувати втрати сировини під час транспортування. Сучасний цукробуряковий завод являє собою велике промислове підприємство, яке за проєктними потужностями може переробляти від 1,5 до 6 тисяч тон цукрових буряків на добу.

У нових економічних умовах багато заводів значно скоротили виробництво цукру через зменшення обсягів переробки вітчизняних буряків. Натомість спостерігається збільшення переробки імпортного тростинного цукру-сирцю. Одночасно різко скоротилися площі посівів і обсяг заготівлі цукрових буряків, що негативно позначається на стабільності виробництва.

Більшість основних виробничих фондів цукрових заводів сильно зношені, що потребує модернізації і технічного переоснащення. Відновлення та подальший розвиток вітчизняного цукробурякового комплексу багато в чому залежить від здатності створити виробництво, конкурентоспроможне на світовому ринку, здатне ефективно поєднувати використання місцевої сировини та сучасні технології переробки.

Особливості виробництва цукру-піску з цукрових буряків зумовлені тим, що кінцевий продукт практично складається з чистої сахарози. Досягнення такого високого рівня чистоти обумовлює необхідність проведення на всіх стадіях технологічного процесу ретельного очищення як вихідної сировини, так і напівфабрикатів від різноманітних забруднень та сторонніх домішок.

Значна увага приділяється чистоті зовнішньої поверхні буряків, дифузійного соку та кристалів білого цукру. Це забезпечує високу якість цукру-піску, стабільність його фізико-хімічних характеристик та відповідність стандартам харчової промисловості.

Зовнішню поверхню коренеплодів цукрових буряків очищають від різного роду домішок: легких, що плавають на воді, та важких, таких як камінці, пісок та інші сторонні частинки. Значна частина забруднень видаляється ще під час

транспортування буряків у вигляді буряководяної суміші на завод. Домішки, міцно прилиплі до поверхні коренеплодів, усуваються за допомогою механічних робочих органів мийних машин, що забезпечує ретельне очищення перед подальшою переробкою.

Вода є найбільш ресурсомістким компонентом у процесі виробництва цукру. При використанні прямоточних схем водопостачання, без повторного або оборотного застосування, її витрати сягають приблизно 1800 % від маси перероблюваних буряків. Промислові стічні води потребують спеціальної очистки, щоб запобігти негативному впливу на навколишнє середовище.

Завдяки повній механізації збиральних та вантажно-розвантажувальних робіт, рівень забруднення буряків землею та зеленою масою значно зріс. Підвищена забрудненість буряків веде до збільшення обсягів транспортних перевезень, зростання витрат води на миття та підвищеного навантаження на очисні споруди. Це, у свою чергу, знижує ефективність переробки, спричиняє додаткові витрати та негативно впливає на конкурентоспроможність виробництва.

Слід відзначити, що навіть за всіх прикладених зусиль не завжди вдається забезпечити буряк з достатньо чистою зовнішньою поверхнею, необхідною для прогресивних технологічних схем. Це призводить до інтенсивного зношування обладнання. Зокрема, практичне застосування дискових бурякорізок ускладнене через їхнє швидке абразивне зношування. Водночас серед різних типів бурякорізок саме дискові відзначаються нижчим енергоспоживанням та здатністю виробляти бурякову стружку високої якості. Для їх надійної роботи потрібен вищий рівень чистоти буряків, проте це не заважає широкому застосуванню дискових бурякорізок на передових зарубіжних цукрових заводах.

Дифузійний сік містить приблизно 16–19 % сухих речовин, з яких 14–17 % становить сахароза, а близько 2 % — нецукри. При кристалізації одна частина нецукрів здатна утримувати у розчині 1,2–1,5 частини сахарози. Тому одним із ключових завдань технології цукрового виробництва є максимально ефективне видалення нецукрів із цукрових розчинів.

До складу нецукрів входять численні речовини, зокрема органічні кислоти, білки, пектини, жири, продукти розкладу сахарози у водних розчинах на глюкозу та фруктозу під дією іонів водню або ферментів, а також фарбувальні речовини та інші домішки. Нецукри характеризуються різноманітними фізико-хімічними властивостями, що зумовлює багатство реакцій і зумовлює необхідність їх ретельного видалення з дифузійного соку для отримання чистої сахарози.

Основні етапи фізико-хімічного очищення дифузійного соку виконуються у визначеній послідовності. Спочатку проводиться попередня дефекація, за якою слідує основна дефекація, спрямована на видалення більшості нецукрів та домішок. Далі здійснюється перша сатурація, після якої проводиться друга сатурація для подальшого очищення соку. Після цього відбувається відділення осаду, а завершальним етапом є сульфітація, яка забезпечує стабілізацію соку та поліпшення його кольорових і хімічних характеристик.

Дефекація **–** це технологічний процес обробки дифузійного соку вапняними розчинами (вапняною крейдою).

Метою попередньої дефекації є коагуляція та осадження колоїдних речовин, до яких належать білки, пектинові та інші компоненти. Цей процес забезпечує формування стабільної структури осаду та зменшує колоїдну дисперсність соку. Під час попередньої дефекації відбувається також нейтралізація кислот і осадження солей кальцію.

Основним завданням лужної дефекації є:

- ✓ розкладання амідів кислот та солей амонію;
- ✓ зменшення вмісту редуктуючих речовин;
- ✓ омилення жирів;
- ✓ створення надлишку вапна, необхідного для формування достатньої кількості осаду $CaCO_3$ на першій сатурації.

Таким чином, попередня дефекація готує дифузійний сік до подальшого очищення, забезпечуючи високу якість цукрового розчину та стабільність технологічного процесу.

Сатурація – це процес обробки дефекованого соку сатураційним газом, що містить діоксид вуглецю (CO_2). У результаті цієї обробки утворюються кристали карбонату кальцію ($CaCO_3$), на поверхні яких адсорбуються частинки нецукрів та коагуляту, що залишилися після дефекації.

Після першої сатурації утворений осад карбонату кальцію з адсорбованими нецукрами та коагулятом відокремлюють від соку методом відстоювання або фільтрування і виводять у відходи.

Далі у сік додають вапно і проводять другу дефекацію. На другій сатурації на поверхні нового осаду $CaCO_3$ відбувається додаткове осадження солей кальцію та інших нецукрів. Після цього осад відокремлюють, що дозволяє значно підвищити чистоту цукрового розчину перед подальшим випарюванням і кристалізацією.

Таким чином, сатурація є ключовим етапом очищення дифузійного соку, забезпечуючи видалення нецукрів і стабілізацію технологічного процесу для отримання високоякісного цукру..

Сульфітація – це процес обробки цукрового соку або сиропу сірчистим газом (SO_2) або сірчистою кислотою. Метою сульфітації є зменшення в'язкості розчинів цукру та зниження їх природного забарвлення, що сприяє отриманню світлішого й більш прозорого продукту.

Після проведення сульфітації сироп або сік піддають фільтруванню, щоб відокремити утворений осад та тверді частинки. Це дозволяє підвищити якість цукру і підготувати його до подальшого випарювання та кристалізації.

Кількість нецукрів у вихідній сировині істотно впливає на ефективність очищення дифузійного соку: чим більше нецукрів, тим складніше досягти необхідної чистоти, тобто високої масової частки сахарози в перерахунку на сухі речовини. Співвідношення сахарози та нецукрів у буряках залежить від їх технологічних характеристик.

Наприклад, квітучі коренеплоди мають знижений на 2–3 % вміст сахарози та підвищену кількість редукуючих речовин. У підв’ялених буряках чистота дифузійного соку нижча на 4–12 % порівняно з нормальними коренеплодами.

Коренеплоди із сильними механічними пошкодженнями втрачають під час гідроподачі до 0,16–0,30 % сахарози у транспортерно-мийну воду.

Наявність зеленої маси на поверхні буряків зменшує чистоту дифузійного соку на 1,7–2,6 %. При зберіганні дефектних коренеплодів погіршення їх якості відбувається швидше, ніж у нормальних буряків. Таким чином, заготівля та переробка буряків погіршеної якості призводить до втрат сахарози, знижуючи вихід цукру та конкурентоспроможність виробництва.

Сахароза добре розчиняється у воді, і її розчинність значно зростає зі збільшенням температури. У водних розчинах сахароза діє як сильний дегідрат, легко утворюючи пересичені розчини, кристалізація яких починається лише при наявності центрів кристалізації. Швидкість кристалізації залежить від температури, в'язкості розчину та ступеня пересичення.

Сам процес кристалізації дозволяє із багатокомпонентного сиропу виділити практично чисту сахарозу. Технологічна схема передбачає таку кількість кристалізаційних ступенів, щоб сумарний вихід кристалів забезпечував різницю чистоти між сиропом і мелясою на рівні 30–33 %. Зазвичай на цукрових заводах застосовують дво- або триступеневу кристалізацію. Товарний цукор-пісок отримують переважно на першому ступені.

Двоступенева кристалізаційна схема є простішою та економічнішою за триступеневу, проте при її використанні не завжди вдається повністю видалити сахарозу з меляси та отримати цукор-пісок найвищої якості. Готовий товарний цукор-пісок висушується до нормативної вологості: 0,04 % — для безтарного зберігання та до 0,14 % — при фасуванні в мішки або пакети..

Зберігання цукру на цукрових заводах ускладнюється тим, що основна продукція виробляється протягом обмеженого періоду (кількох місяців), після чого її необхідно зберігати протягом тривалого часу. Для ефективного використання об’єму цукрового складу мішки з цукром укладають у штабелі. При цьому застосовують різноманітні пересувні підйомники для формування та переміщення штабелів.

Щоб забезпечити належну вентиляцію і запобігти підвищенню вологості, під мішки зазвичай підкладають дерев'яні решітки, які підтримують їх на висоті приблизно 100 мм від підлоги. Така конструкція дозволяє повітрю вільно циркулювати під штабелями, знижуючи ризик утворення конденсату та злежування продукту.

Для збереження високої якості цукру у складі особливу увагу приділяють підтриманню оптимальних параметрів середовища: стабільної температури та відносної вологості повітря. Недотримання цих умов може призвести до злежування цукру, його втрати сипучості та погіршення органолептичних властивостей.

Силоси для безтарного зберігання цукру повинні мати конструкцію, яка виключає можливість конденсації та накопичення вологи на внутрішніх поверхнях. Такі склади оснащують системами кондиціювання повітря та аспіраційними установками, що дозволяють очищати повітря до рівня, безпечного від вибуху цукрового пилу.

Для транспортування неупакованого цукру споживачам використовують спеціальні вагони-хопери, конструкція яких забезпечує зручне завантаження та вивантаження продукції без контакту із зовнішнім середовищем, що гарантує збереження якості цукру.

1.3. Характеристика властивостей цукровмісної сировини

Сировиною для виробництва цукру служать ***рослини-цукроноси***, які містять у своєму складі цукрозу. Найпоширенішими з них є цукровий буряк, цукрова тростина, цукрове сорго, цукрова кукурудза, цукровий клен, цукрова пальма та ріжкове дерево. Кожен із цих видів рослин використовується для отримання цукру у вигляді кристалів або сиропів, залежно від технології переробки та регіону вирощування.

Таблиця 1 – Основні цукроносні рослини та їх використання у виробництві цукру

Рослина-цукронос	Частина, що використовується	Тип цукру / продуктів, що отримують	Додаткові відомості
Цукровий буряк	Коренеплоди	Цукор-пісок, сироп, патока	Вміст сахарози: 16–20%; вирощується переважно в помірному кліматі; висока врожайність на гектар.
Цукрова тростина	Стебла	Цукор-пісок, тростинний сироп, патока	Вміст сахарози: 12–18%; тропічні та субтропічні регіони; врожайність більша за буряк за гектар, але сахарози трохи менше.
Цукрове сорго	Стебла	Цукор, сироп	Вміст сахарози: 12–15%; висока стійкість до посухи; вирощується в тропіках та субтропіках; використовують для виробництва сиропу та кормових продуктів.
Цукрова кукурудза	Зерна	Кукурудзяний сироп, глюкозні сиропи	Вміст сахарози: 10–12% (для солодких сортів); поширена у помірному та тропічному кліматі; використовують для глюкозних сиропів, цукру та харчових концентратів.
Цукровий клен	Сік з деревини	Кленовий сироп, цукрові кристали	Вміст сахарози: 1,5–2% у соку; вирощується в Північній Америці; сироп добувають шляхом випарювання соку.
Цукрова пальма	Сік	Пальмовий цукор, сироп	Вміст сахарози: 10–15%; тропічні регіони Азії та Африки; сік піддають випарюванню для отримання пальмового цукру.
Ріжкове дерево (карамбола)	Стручки	Ріжковий сироп, цукровий порошок	Вміст сахарози: 50–60% сухої речовини; тропічні регіони; стручки переробляють на порошок або сироп як замінник цукру.

Цукрові буряки – основна сировина для цукрового виробництва в Україні. Вони належать до родини маренових і є дворічною рослиною. У перший рік росту формується коренеплід із розеткою прикореневих листків, який накопичує сахарозу та слугує основним джерелом цукру. На другий рік із висаджених коренеплодів розвивається квітоносне стебло заввишки 1,5–2,0 м, на якому формуються насіннєві клубочки – джерело насіння для майбутніх посівів.

Для цукрової промисловості використовують коренеплоди першого року росту, оскільки вони мають максимальний вміст сахарози. Заготівля буряків передбачає поділ коренеплодів за призначенням: фабричні корені йдуть на переробку для отримання цукру, тоді як маточні корені використовують для вирощування насіння. Такий поділ дозволяє ефективно поєднувати промислове виробництво цукру та насінництво, забезпечуючи стабільність та високу якість продукції.



Рис. 1. Цукрові буряки [1]

Урожайність цукрових буряків в Україні коливається в межах 250–320 ц/га і переважно залежить від якості насіння, родючості ґрунтів, погодних умов та догляду за посівами. За несприятливих метеоумов або порушення агротехнічних термінів буряки першого року можуть формувати квітоносні пагони і навіть плодоносити – такі рослини називають квітушними. У їхніх коренеплодах відбувається деревеніння клітинних стінок із підвищеним вмістом лігніну, що ускладнює різання в стружку: опір різанню у таких буряків у 3–5 разів більший, ніж у звичайних.

Коренеплід цукрових буряків першого року має грушоподібну або веретеноподібну форму і складається з голівки, шийки, власне кореня та

хвостика. Уздовж коренеплоду по спіралі розташовані борозенки, з яких ростуть корінці з кореневими волосками, що пронизують ґрунт на площі близько 1 м² і досягають глибини 2,5 м. Така розгалужена коренева система забезпечує буряку високу стійкість до посухи.

Коренеплід цукрового буряка покритий захисним зовнішнім шаром — перидермою, яка оберігає тканини від механічних пошкоджень і патогенів. Основна маса коренеплоду складається з паренхімної тканини, утвореної клітинами, заповненими буряковим соком. Ця тканина є не тільки резервуаром для цукру та інших речовин, але й забезпечує збереження води та обмін поживними компонентами.

Паренхіму пронизують численні судинні пучки, розташовані концентричними колами, які надають коренеплоду механічну міцність та стабільність форми. Вміст сухих речовин у коренеплоді коливається в межах 20–25 %, із яких 14–18 % становить сахароза. Практично вся сахароза, а також частина нецукрів знаходяться у розчиненому вигляді в клітинному соку.

Для оцінки концентрації цукру у буряках використовують показник, що отримав назву сокового коефіцієнта — він відображає масову концентрацію бурякового соку в коренеплоді і є одним із ключових показників якості сировини для цукрового виробництва.

Синтез цукрози в цукрових буряках є надзвичайно складним біохімічним процесом, що відбувається в клітинах коренеплоду протягом першого року розвитку рослини. Поряд із сахарозою, яка є основним продуктом синтезу, утворюються й інші органічні сполуки – переважно органічні кислоти (яблучна, лимонна, щавлева та ін.), амінокислоти, пектини та невелика кількість фенольних речовин. Ці компоненти визначають природний кислий характер свіжого бурякового соку, pH якого коливається в межах 6,2–6,7.

Крім органічних речовин, у коренеплодах накопичуються й неорганічні солі, зокрема кальцій, калій, натрій, магній та фосфор. Основним джерелом цих мінеральних елементів є добрива, що вносять у ґрунт для підживлення буряків. Вміст цих елементів безпосередньо впливає на хімічний склад бурякового соку,

його кислотність та мінеральну жорсткість, а відтак – на ефективність технологічного процесу переробки. Наприклад, підвищений вміст кальцію сприяє утворенню осаду при дефекації та сатурації, а надлишок калію чи натрію може ускладнювати кристалізацію сахарози.

Важливу роль у технології відіграє також співвідношення органічних кислот і мінеральних сполук, оскільки вони визначають стабільність бурякового соку та здатність нецукрів адсорбуватися на кристалах карбонату кальцію під час очистки. Таким чином, знання хімічного складу та фізико-хімічних властивостей соку є ключовим для оптимізації процесів дефекації, сатурації та кристалізації, що дозволяє отримати цукор високої якості при максимальному виході з сировини.

Вміст цукрози в цукрових буряках коливається в межах 15–22 %, при цьому середнє значення становить близько 17,5 %. З 100 кг буряка приблизно 75 кг складає вода, з яких 3 кг міцно зв'язані з колоїдними речовинами, а решта 72 кг функціонують як розчинник для цукрози (17,5 кг) та нецукрів (2,5 кг). Таким чином, у 100 кг буряка міститься близько 92 кг нерозбавленого бурякового соку, що включає сахарозу, нецукри та воду-розчинник.

Ці дані підкреслюють високий ступінь концентрації цукру в буряках і визначають потенційну ефективність вилучення сахарози під час технологічного процесу виробництва цукру.

Коренеплоди цукрових буряків, як сировина для переробки, характеризуються багатьма властивостями – фізичними, фізико-хімічними, хімічними, біохімічними, мікробіологічними та технологічними. Фізичні параметри буряків, такі як розмір і форма, залежать від якості насіння, умов вирощування та агротехнічних заходів. Для переробки найбільш придатними вважають коренеплоди круглої форми та однорідного розміру.

Тургор кореня є показником свіжості та здатності буряка легко різатися на стружку, а також його стійкості до інфекцій. Структура тканин визначається, зокрема, їх дерев'янистістю – сильно дерев'янисті коренеплоди важко

подрібнювати, що ускладнює технологічний процес. Співвідношення м’якуша та соку залежить від сорту, агротехніки, ступеня зрілості та погодних умов.

М’якуш коренеплоду, особливо в периферійних частинах, має високий рівень гідратації. Високий вміст м’якуша підвищує опір буряка при різанні, збільшує вихід жому і зменшує кількість вільного соку. При цьому близько половини сухих речовин м’якуша складають пектинові речовини, які можуть переходити з бурякової стружки в сік. Тому для ефективної переробки бажано, щоб коренеплід містив максимальну кількість соку.

Фізико-хімічні властивості цукрових буряків визначають ефективність дифузії цукру з клітин коренеплоду. Швидкість дифузії залежить від молекулярної маси речовини: чим менша молекулярна вага, тим швидше відбувається її перенесення. Крім того, дифузія зумовлюється здатністю білків протоплазми до згортання: при певних температурах білки денатурують, що підвищує проникність клітинних стінок і полегшує проходження речовин через пористі перегородки. Висока здатність буряків утримувати воду забезпечує підтримку оптимального фізичного стану сировини, що сприяє отриманню якісної стружки при механічному різанні коренів.

Хімічні властивості цукрових буряків визначаються їхнім складом, насамперед вмістом цукрози. Цей показник, виражений у відсотках від маси коренеплоду, характеризує цукристість буряка і безпосередньо впливає на потенційний вихід цукру. Розподіл цукрози в різних частинах кореня нерівномірний: найменше її міститься в голівці, середній рівень — у хвостовій частині, а найбільше — у центральній частині коренеплоду. Таким чином, чим вищий вміст цукрози у буряках, тим більший потенційний вихід кристалічного цукру під час переробки.

До нецукрів належать усі речовини, крім цукрози, зокрема целюлоза, геміцелюлози, протопектин, білки, лігнін, сапоніни (нерозчинні компоненти), а також аміноз’єднання, інвертний цукор, безазотисті органічні кислоти, пектин, зольні сполуки та інші розчинні речовини. Деякі з цих компонентів містяться як у буряковому соці, так і в нерозчинному м’якуші. Наприклад, більшість білків

присутні в соці, проте частина їх пов’язана з пектиновими речовинами та геміцелюлозами м’якуша. До 60 % сапоніну також пов’язано з м’якушем, решта перебуває в розчиненому стані в соці. Редукуючі речовини, зокрема інвертний цукор, накопичуються у спілих буряках у невеликій кількості — близько 0,05–0,2 % від маси коренеплоду. Додаткове їх утворення відбувається під дією кислот і внаслідок біохімічних процесів. Небажаним є те, що редукуючі речовини під час дефекації швидко розкладаються з утворенням кислот, які не осаджуються, а переходять у розчин у вигляді кальцієвих солей, що спричиняє підвищену забарвленість бурякового соку.

Велика частина азотистих сполук у буряковому соці легко видаляється під дією вапна та при нагріванні. Проте деякі речовини, зокрема амінокислоти та бетанін, негативно впливають на процес переробки: вони утруднюють кристалізацію цукрози, погано видаляються під час очищення та залишаються в соку. Колоїдні пектинові та білкові речовини затримують фільтрацію, ускладнюють циркуляцію продуктів у апаратах, перешкоджають нормальному формуванню кристалів і центрифугуванню утфелю. Мінеральні нецукри, представлені золою, теж мають шкідливий вплив, оскільки підвищують розчинність цукрози і ускладнюють її виділення у кристалічній формі. Сапоніни спричиняють інтенсивне пінення бурякового соку та води в мийному відділенні, що ускладнює технологічний процес.

Біохімічні властивості коренеплодів цукрових буряків значною мірою визначаються їх ферментним складом. Ферменти можуть активувати гідроліз сахарози з утворенням глюкози та фруктози, що призводить до накопичення інвертного цукру. Стійкість м’якуша до гідролізу особливо порушується при зміні мікробіологічного стану буряків, зокрема у разі ураження їх мікроорганізмами. Різні хвороби, набуті буряками під час росту, погіршують їх здатність до тривалого зберігання і ускладнюють переробку коренеплодів у свіжому вигляді безпосередньо після збору.

Буряковий сік створює сприятливе середовище для швидкого розмноження мікроорганізмів, які використовують сахарозу як джерело

поживних речовин. У соку присутні амінокислоти, ростові фактори та мінеральні солі, необхідні для розвитку бактерій та грибів. Тому одним із ключових показників якості коренеплоду є мінімальний вміст грибної та бактеріальної мікрофлори, що забезпечує безпечне зберігання і ефективну переробку буряків на цукор.

Перераховані загальні властивості цукрових буряків суттєво впливають на формування їх технологічних характеристик. Зокрема, структура м'якуша та його дерев'янистість визначають легкість різання кореня, еластичність і стисливість бурякової стружки. Доброякісність коренеплодів, а відтак і чистота бурякового соку, залежить від співвідношення концентрації сахарози до загальної маси сухих речовин у коренеплоді.

Фізичний стан буряків оцінюють за наявністю нормального тургору та відсутністю уражень чи захворювань. Коефіцієнт дифузії, тобто здатність коренеплодів віддавати цукрозу, у здорових буряків завжди вищий, ніж у пошкоджених або хворих. Хімічний склад соку та сиропів визначає рівень їх лужності: його підвищують аміди, редукуючі речовини, магній, кальцій та амінокислоти, а знижують — щавлева й фосфорна кислоти, пектин, білки та інші компоненти.

Зміни лужності безпосередньо впливають на процеси кристалізації: при її зниженні зростає утворення кальцієвих солей, що може ускладнювати подальшу обробку соку, а при підвищенні лужності погіршується якість кристалізації утфеля, що негативно відображається на виході та чистоті готового цукру.

До цукрових буряків як сировини для цукробурякового виробництва висуваються такі основні вимоги:

- ✓ Високий вміст цукрози в коренеплодах та забезпечення максимальної продуктивності цукру з одиниці площі посіву;
- ✓ Відсутність масової квітчастості та дерев'янистості тканин, що забезпечує легкість різання коренеплодів у стружку;
- ✓ Оптимальна форма кореня, бажано округла, із підвищеним вмістом цукру у головній та хвостовій частинах;

- ✓ Низька біологічна та фізіологічна активність, що мінімізує втрати цукру під час зберігання та транспортування;
- ✓ Висока водоутримуюча здатність і морозостійкість, що сприяє збереженню тургору та якості буряків;
- ✓ Стійкість до захворювань, яка гарантує менші втрати при зберіганні і переробці;
- ✓ Доброякісний буряковий сік, з низьким вмістом колоїдних речовин та високою коагулюючою здатністю;
- ✓ Мінімальний вміст шкідливих компонентів, таких як азотисті речовини, розчинна зола та інвертний цукор, що негативно впливають на процес кристалізації.

Поряд із оцінкою технологічних властивостей цукрових буряків значну увагу приділяють фізико-хімічним характеристикам продуктів їх переробки. До таких показників відносять: швидкість та характер осадження нецукрів під час очищення соку, швидкість фільтрації та її коефіцієнт, швидкість кристалізації цукрози, кольоровість та каламутність продуктів, їх в'язкість, поверхневий натяг та інші фізико-хімічні властивості. Ці показники визначають виробничу цінність буряків і залежать як від їхніх основних фізичних, хімічних та біохімічних властивостей, так і від режимів та технологічних параметрів їх переробки.

Окрім цукрових буряків, існують і інші рослини-цукроноси, які використовуються як джерела цукрози у харчовій та промисловій галузях.

Цукрова тростина належить до родини злакових і є основною сировиною для виробництва цукру в багатьох тропічних країнах. Для її успішного вирощування необхідні високі температури повітря, достатня вологість і родючий ґрунт, який не піддається заболочуванню. Після досягнення тростиною зрілості її збирають вручну або механізовано, а з кореневищ починають відростати нові пагони. Такий процес дозволяє знімати урожай протягом 4–5 років на одному полі, а в окремих регіонах і до 20 років, забезпечуючи тривале використання посівів.



Рис. 2. Цукрова тростина [2]

Середній хімічний склад цукрової тростини (у відсотках): вода – 74,5 %, сахароза – 12 %, фруктоза – 0,9 %, глюкоза – 0,6 %, клітковина та інші полісахариди – 10 %, зола – 0,5 %, азотисті речовини – 0,4 %, жири та віск – 0,2 %, пектин – 0,2 %, органічні кислоти – 0,2 %.

Цукрове сорго – це посухостійка злакова культура, яка добре росте та розвивається в південних регіонах України. Максимальне накопичення цукрози у стеблах спостерігається в період дозрівання зерна, завдяки чому сорго забезпечує врожай як стебел, так і зерна. Середній хімічний склад стебел цукрового сорго (%): вода – 66, цукроза – 11, редукуючі цукри – 3, клітковина – 7, крохмаль – 5, білок – 3, камеді – 3, пектинові речовини – близько 1, зольні елементи – приблизно 1.



Рис. 3. Цукрове сорго [3-4]

Цукровий клен поширений у Північній Америці, зокрема в США та Канаді, а деякі його види зустрічаються також в Україні та на Кавказі.



Рис. 4. Цукровий клен [5]

Кленовий сік збирають у період весняного руху соків, який зазвичай триває з лютого до квітня, коли дерево активно транспортує воду і розчинені в ній поживні речовини від кореневої системи до листя. Для відбору соку у стовбурі дерева просвердлюють отвір діаметром 10–12 мм і глибиною 30–40 мм, після чого встановлюють спеціальні трубочки, через які сік стікає у приймачі. Збір соку здійснюють протягом 30–40 днів, враховуючи добову зміну об'єму виділеного соку та температурні умови, що впливають на інтенсивність сокоруху. З одного дерева можна отримати від 45 до 90 літрів соку, який є основою для подальшого виробництва кленового цукру і сиропу. Інтенсивність збору залежить від віку дерева, його розміру, кліматичних умов та догляду за насадженнями, а також від точності техніки буріння та обладнання для збору соку.

1.4. Види цукру

Існує понад 61 різновид цукру, причому деякі з них добре відомі, наприклад, кукурудзяний сироп з високим вмістом фруктози. Інші назви, як-от маноза, можуть зовсім не нагадувати слово «цукор», хоча за хімічною природою вони ним є. Важливо усвідомлювати кількість споживаного населенням цукру, адже його надмірне вживання пов'язане з розвитком численних захворювань,

включаючи ожиріння, діабет та карієс. Цукор надходить з різних джерел і має безліч найменувань, що відображають його хімічну структуру або походження. Основою цукрів є моносахариди — найпростіші цукри, які не можна розкласти на більш прості компоненти. До цієї групи належать, наприклад, глюкоза, фруктоза та галактоза. Поєднання двох моносахаридів дає дисахариди — більш складні цукри, до яких належать, зокрема, сахароза, лактоза та мальтоза.

Глюкоза. Глюкоза відноситься до моносахаридів — найпростіших форм цукру. Вона широко поширена в багатьох харчових продуктах і є основною формою цукру, що міститься в рослинах. Для організму людини глюкоза є головним джерелом енергії: незалежно від того, який вид цукру ми споживаємо, більшість із них під час травлення розщеплюється саме до глюкози. Крім того, глюкоза може з'єднуватися з іншими моносахаридами, утворюючи дисахариди, такі як сахароза, лактоза та мальтоза.

Фруктоза. Фруктоза, як і глюкоза, належить до моносахаридів — найпростіших форм цукру. Вона природно міститься у фруктах, деяких коренеплодах та меді. Фруктоза відзначається найвищою солодкістю серед усіх природних цукрів, завдяки чому її часто використовують як підсолоджувач. На відміну від глюкози, фруктоза метаболізується переважно в печінці, де перетворюється на енергію або запасні форми — глікоген та жирні кислоти.

Галактоза. Галактоза — ще один поширений моносахарид, який хімічно складається з тих самих елементів, що й глюкоза, але має іншу просторову структуру молекули. Вона рідше зустрічається у вільному вигляді, ніж глюкоза чи фруктоза, і переважно міститься в продуктах бобових, таких як горох, а також є складовою частиною лактози — цукру, що міститься в молоці. Галактоза відіграє важливу роль у біохімічних процесах організму, зокрема в синтезі гліколіпідів і глікопротеїнів.

Сахароза. Сахароза — це дисахарид, який утворюється з однієї молекули глюкози та однієї молекули фруктози, з'єднаних хімічним зв'язком. Вона природно присутня в багатьох рослинах і є основним компонентом столового

цукру. Стандартний цукор, який ми використовуємо в побуті, отримують переважно з цукрових буряків або цукрової тростини.

Лактоза. Лактоза — це цукор, який природно міститься в молоці та молочних продуктах. Вона складається з молекул глюкози та галактози. Під час бродіння лактоза перетворюється на молочну кислоту, що необхідно для виготовлення йогурту та сиру. Для засвоєння лактози організму потрібен спеціальний фермент — лактаза, який розщеплює її на глюкозу та галактозу. У разі нестачі цього ферменту виникає непереносимість лактози.

Мальтоза. Мальтоза — це дисахарид, що складається з двох з'єднаних молекул глюкози. Вона природним чином утворюється як побічний продукт розщеплення вуглеводів і міститься в пророщених зернах. Під час проростання зерна розщеплюють крохмаль, внаслідок чого й виробляється мальтоза.

Натуральний цукор проти доданого цукру. Зрештою, ваш організм перетравлює всі види цукру однаково, оскільки натуральний і доданий цукор мають однакову хімічну структуру. Натуральний цукор міститься в самих харчових продуктах, тоді як виробники часто додають цукор під час обробки та виготовлення продуктів. Головна відмінність полягає в тому, що природний цукор міститься у фруктах і овочах, які додатково забезпечують організм клітковиною, вітамінами та іншими корисними сполуками. Наприклад, навіть у такому солодкому фрукті, як яблуко, міститься лише 19 грамів цукру, а разом з ним — 3 грами клітковини та речовини, що можуть знижувати ризик розвитку раку та серцево-судинних захворювань. Американська кардіологічна асоціація рекомендує щодня вживати не більше 24 грамів доданого цукру для жінок та 36 грамів для чоловіків.

Проблема із занадто великою кількістю цукру. Вживання продуктів з високим вмістом цукру може призвести до низки проблем зі здоров'ям, серед яких:

- ✓ Неповноцінне харчування – продукти з доданим цукром часто замінюють більш корисні продукти, що призводить до дефіциту поживних речовин;

- ✓ Збільшення ваги – солодкі продукти та напої легко споживати у великій кількості, що сприяє надлишковому калорійному споживанню;
- ✓ Карієс – цукор є поживним середовищем для бактерій у роті, які руйнують зубну емаль;
- ✓ Підвищений рівень тригліцеридів – надмірний цукор підвищує концентрацію цього виду жиру в крові, що може негативно впливати на серцево-судинну систему.

Цукор на харчових етикетках. Управління з контролю за якістю харчових продуктів і медикаментів (FDA) вимагає, щоб на етикетках харчових продуктів обов'язково вказувався вміст цукру, включаючи кількість доданого цукру, який відрізняється від натурального цукру, що природно міститься у продуктах. Інгредієнти повинні перелічуватися у порядку зменшення їхньої ваги. Підсолоджувачі, які застосовуються у харчових продуктах не у формі звичайного столового цукру, можуть мати різні назви, серед яких: нектар агави, коричневий цукор, випарений сік тростини, солодовий сироп, фруктоза, кленовий сироп, очеретяні кристали, концентрат фруктового соку, меляса, тростинний цукор, глюкоза, цукор-сирець, кукурудзяний підсолоджувач, кукурудзяний сироп з високим вмістом фруктози, сахароза, мед, сироп, кристалічна фруктоза, інвертний цукор, декстроза та мальтоза. Така інформація допомагає споживачам оцінити кількість доданого цукру в продуктах і робити більш усвідомлений вибір на користь здорового харчування.

1.5. Найпоширеніші видів цукру та їх використання

Цукор використовується не лише для підсолоджування випічки, солоних страв та напоїв – він виконує й інші важливі функції. Наприклад, він покращує смак і текстуру страв, робить тісто м'яким, стабілізує яєчний білок під час приготування безе або «Павлової», а також надає випічці привабливий золотисто-коричневий колір. Далі розглянемо 10 видів цукру та їх оптимальне застосування, починаючи від білого та коричневого цукру і закінчуючи цукром демерара.

Демерара — це вид цукру, що виробляють із цукрової тростини. Свою назву він отримав від річки Демерара в Гаяні (Південна Америка), звідки спочатку його постачали.

Білий цукор, відомий також як цукровий пісок або столовий цукор, отримують шляхом рафінування цукрової тростини або цукрових буряків. Спочатку за допомогою спеціального обладнання з рослинної сировини віджимають сік, який потім кип'ятять для випаровування води. Цукор-сирець піддають центрифугуванню на високих обертах, щоб видалити липкий коричневий сироп – патоку, що покриває кристали. Далі цукор проходить через систему природної вуглецевої фільтрації, яка очищує його від домішок та відбілює гранули. В результаті утворюється практично чиста сахароза, готова до споживання та подальшого використання.

Білий цукор застосовують у різноманітних харчових продуктах, таких як хлібобулочні вироби, що потребують підйому, наприклад меренги, муси та суфле. Його також використовують для підсолоджування напоїв і деяких солоних страв. Водночас слід зауважити, що не весь білий цукор-пісок є веганським — деякі виробники застосовують кісткове вугілля для відбілювання цукру. Тому веганам рекомендується обирати нерафінований або органічний цукор.

1.5.1. Види білого цукру

Цукровий пісок (гранульований цукор). Цукровий пісок — це гранульований рафінований цукор, відомий також як звичайний або білий цукор. Його спеціально відбілюють і подрібнюють до гранул розміром, схожим на кухонну сіль. Цей вид цукру найчастіше застосовують у випічці та різних кулінарних рецептах.

Супертонкий цукор. Супертонкий цукор — це найдрібніший вид цукру, який іноді називають цукровою пудрою. Його виробляють за тією ж технологією, що й звичайний білий цукор, але кристали додатково подрібнюють до значно менших розмірів. Завдяки своїй дрібній структурі, цей цукор ідеально

підходить для десертів, таких як меренга, муси та збиті вершки, а також швидко розчиняється в холодних напоях — наприклад, у холодному чаї чи лимонаді.

Цукрова пудра (кондитерський цукор). Цукрова пудра, або кондитерський цукор, представляє собою дрібно подрібнений білий цукор, до якого додають невелику кількість кукурудзяного крохмалю. Завдяки своїй тонкій структурі вона швидко розчиняється, що робить її ідеальною для приготування глазурі, кремових десертів та інших кондитерських виробів.

Кубики цукру. Це невеликі квадратні блоки, виготовлені зі спресованого білого цукру. Їх переважно застосовують для швидкого та зручного підсолоджування гарячих напоїв, таких як чай чи кава.

Таблиця 2 – Види білого цукру та особливості його використання

Вид білого цукру	Опис	Використання
Цукровий пісок (гранульований цукор)	Рафінована сахароза середнього розміру кристалів, схожих на кухонну сіль	Випічка, підсолоджування напоїв, соусів та солоних страв
Супертонкий цукор (дрібний цукор)	Дрібніші кристали білого цукру, швидко розчиняються	Десерти, меренги, муси, збиті вершки, холодні напої
Цукрова пудра (кондитерський цукор)	Дрібно розмелений білий цукор, часто з невеликою кількістю кукурудзяного крохмалю	Глазурі, креми, десерти, випічка, де потрібна швидка розчинність
Кубики цукру	Білий цукор, спресований у кубики	Підсолоджування гарячих напоїв, таких як чай і кава

Білий цукор існує у кількох видах, які відрізняються розміром кристалів та сферою застосування. Гранульований цукор підходить для випічки та напоїв, супертонкий і кондитерський — для кремів, меренг і десертів, а цукрові кубики зручні для гарячих напоїв. Кожен вид має специфічні властивості, що впливають на розчинність, текстуру та смакові характеристики продуктів.

1.5.2. Види коричневого цукру

Коричневий цукор отримують шляхом змішування кристалічної сахарози з патокою, яка надає йому характерний колір та смак. Його виробляють у провідних цукровиробничих регіонах світу, зокрема в Карибському басейні,

Бразилії, Австралії, країнах Європи, Південній Африці та окремих районах США.

Коричневий цукор додає більш насичений смак у порівнянні з білим гранульованим цукром і часто використовується у випічці, надаючи виробам глибоку, карамельну солодкість.



а б

Рис. 5. Цукор: а) білий; б) коричневий [6, 7]

Коричневий цукор і випічка на його основі краще утримують вологу, адже патока має здатність поглинати воду. Його широко застосовують у кулінарії — для соусів, маринадів, страв із беконом. Також з нього готують ароматні цукрові сиропи, часто з додаванням спецій, які використовують для надання напоям особливого смаку.

Обсяг патоки, який додають до білого цукру під час виробництва, визначає різновид отриманого коричневого цукру.

Світло-коричневий цукор. Світло-коричневий цукор — це найпоширеніший тип коричневого цукру, який використовується у випічці та кулінарії. Він містить меншу кількість патоки, ніж темно-коричневий, зазвичай близько 3–4 %, що надає йому світліший колір і м’якший, більш делікатний карамельний смак. Через меншу кількість патоки світло-коричневий цукор менше впливає на колір виробів і робить текстуру випічки ніжною, водночас допомагаючи утримувати вологу.

У більшості рецептів, де вказано лише «коричневий цукор», мається на увазі саме світло-коричневий варіант, оскільки він забезпечує баланс між

смаком, кольором і консистенцією. Його широко застосовують у печиві, кексах, пряниках, тістечках, глазурях, кремах та соусах, де потрібна легка карамельна солодкість без надмірного інтенсивного аромату, характерного для темно-коричневого цукру. Крім того, світло-коричневий цукор добре поєднується зі спеціями та сухофруктами, підсилюючи загальний смаковий профіль страви.

Темно-коричневий цукор. Темно-коричневий цукор містить приблизно 6,5 % патоки від загальної маси, що й зумовлює його темніший колір, вологішу текстуру та виразний карамельно-патоковий аромат. У порівнянні зі світло-коричневим цукром він має глибший, більш насичений смак із легкими нотами ірису та карамелі. Підвищений вміст патоки також впливає на технологічні властивості: такий цукор краще утримує вологу, робить випічку м'якшою та більш вологою, уповільнює черствіння виробів.

Його широко використовують у рецептах, де важливі інтенсивний смак і темний колір — у пряниках, імбирному печиві, кексах, мафінах, шоколадних тортах, соусах барбекю, глазурях та маринадах. У поєднанні зі спеціями (корицею, гвоздикою, мускатним горіхом) темно-коричневий цукор підсилює «теплий» смаковий профіль страв. Також він добре підходить для карамелізації, приготування сиропів і десертних соусів, де потрібна глибина смаку та густіша консистенція.

Демерара — це різновид коричневого цукру, який отримують із цукрової тростини. Його назва походить від річки Демерара в Гайані (Південна Америка), де цей цукор вперше почали експортувати. Демерара відрізняється великими золотистими кристалами, легким карамельним смаком і хрусткою текстурою. Він зазвичай використовується для підсолоджування напоїв, посипання випічки, а також у кулінарії для надання легкого карамельного аромату та декоративного ефекту.

Мусковадо (Muscovado) – це м'який тростинний цукор темного кольору з високим вмістом патоки, що надає йому насиченого карамельного смаку та інтенсивного аромату. Кристали цього цукру зазвичай великі та трохи липкі через залишкову вологу, що робить його менш сипким, ніж звичайний білий або

світло-коричневий цукор. Muscovado активно використовують у кулінарії для випічки, приготування десертів, карамелі, соусів та напоїв, де важливі насичений аромат і темний колір, а також для надання стравам характерної патокової солодкості.

Тростинний сироп – це густий рідкий підсолоджувач, який отримують шляхом часткового випарювання соку цукрової тростини. Він має темно-коричневий колір і насичений карамельний смак завдяки високому вмісту патоки та мінеральних компонентів. Тростинний сироп широко застосовують у кулінарії для випічки, приготування соусів, маринадів, напоїв і десертів, де потрібен глибокий солодкий аромат і темне забарвлення. Завдяки рідкій консистенції його легко змішувати з іншими інгредієнтами, що робить його зручним для різноманітних рецептів.

Таблиця 3 – Види коричневого цукру та особливості його використання

Вид цукру	**Вміст патоки (%)**	**Опис та особливості**	**Основне застосування**
Світло-коричневий	3–4	М'який, світло-коричневий колір, ніжний карамельний смак	Випічка, печиво, десерти, якщо в рецепті просто «коричневий цукор»
Темно-коричневий	~6,5	Насичений смак і темний колір, сильний карамельний аромат	Соуси, маринади, випічка, надання глибокого смаку і кольору
Демерара	~5–6	Великі золотисті кристали, легкий карамельний смак, хрустка текстура	Напої, посипання випічки, кулінарія, декоративний ефект
Мусковадо	10–15	Вологий цукор із сильним карамельним і патоковим смаком, темно-коричневого кольору	Десерти, соуси, карамель, напої
Тростинний сироп	Залежить від концентрації	Рідка форма цукру з тростини, інтенсивний карамельний смак	Ароматизація напоїв, соуси, випічка

Коричневий цукор поділяється на світло- і темно-коричневий, відрізняється вмістом патоки, що визначає його колір, смак і аромат. Світло-коричневий цукор широко застосовується у випічці та десертах, тоді як темно-коричневий — для створення насиченого смаку та кольору, а також у соусах,

маринадах і спеціальних сиропах. Обидва види добре зберігають вологу завдяки патоці, що робить їх важливим інгредієнтом у кулінарії.

1.5.3. Цукровий пісок

Цукровий пісок – це цукор-пісок, який має дрібну консистенцію, за крупністю між цукровим піском і цукровою пудрою. Оскільки кристали такі дрібні, вони розчиняються набагато швидше, ніж білий цукор-пісок, що робить цукрову пудру ідеальною для випічки печива, тортів, кексів, кексів і меренг, а також для сиропів і коктейлів. У сирому вигляді його вживають рідко. Він не використовується для глазурі, глазурі або масляного крему. У США цукрову пудру також називають найтоншим цукром, пекарським цукром, касторовим цукром або плитковим цукром.

Цукрова пудра, також відома як кондитерський цукор, — це гранульований білий цукор, подрібнений у дрібний порошок. Вона має майже крейдяну консистенцію, на відміну від цукрового піску, який є більш грубим і піщаним. Комерційна цукрова пудра часто містить кукурудзяний крохмаль, який виконує роль «агенту проти злежування», запобігаючи утворенню великих грудок. Цей кондитерський цукор швидко розчиняється в рідинах і прекрасно підходить для глазурі, а також для посипання пончиків, зефіру та пластівців, покритих шоколадом.

1.6. Види тростинного цукру

Тростинний цукор. На відміну від цукру-піску, який виробляють як із цукрових буряків, так і з цукрової тростини, тростинний цукор виготовляють виключно з цукрової тростини. Процес його виробництва включає подрібнення стебел тростини, вичавлювання соку, кип’ятіння рідини для отримання неочищеної патоки та подальшу кристалізацію цього сиропу. Після кристалізації сироп обробляють у центрифузі, щоб відокремити кристали від патоки. Існує три основних види тростинного цукру: нерафінований, сирий та рафінований. Вони

відрізняються ступенем обробки, яка, по суті, є промиванням, що дозволяє видалити частину, більшість або всю патоку.

Нерафінований цукор. Нерафінований цукор включає такі різновиди, як мусковадо. Він має темний колір і зберігає більшу частину патоки, що надає йому характерного насиченого смаку та аромату.

> **Мусковадо** — це вид частково рафінованого або нерафінованого цукру, який відзначається високим вмістом патоки, насиченим смаком і темно-коричневим кольором. З технологічної точки зору він може класифікуватися як нецентрифугований тростинний цукор або як центрифугований, частково рафінований цукор залежно від застосованого виробником процесу.

Цукор-сирець. Цукор-сирець – це різновид тростинного цукру, до якого належать продукти, такі як турбінадо та демерара. Він представляє собою проміжну стадію обробки: кристали середнього або великого розміру, а колір варіюється від світлого до світло-коричневого.

> **Цукор Turbinado** — це частково рафінований цукор, у якому збережена частина природної патоки, що надає йому ніжний карамельний смак. Він виготовляється з цукрової тростини, яка є генетично не модифікованою, частково органічного походження.
>
> **Демерара** — це вид тростинного цукру з великими кристалами, золотистим кольором і характерним карамельним ароматом. У порівнянні з білим цукром він менш оброблений, що дозволяє зберегти частину корисних мікроелементів, таких як калій, магній, залізо, а також вітаміни групи В.

Цукор-сирець зберігає певну кількість смаку патоки, що надає йому характерний легкий карамельний аромат і делікатну солодкість.

Рафінований цукор. Рафінований цукор включає білий цукор-пісок, пекарський та кондитерський цукор і є найчистішою формою цукру, що практично не містить патоки та домішок. Його подрібнюють у різні тонкі консистенції, кожна з яких має своє застосування. Такий цукор широко використовується у випічці — для печива, тістечок та інших десертів — оскільки легко розчиняється у воді та плавиться при нагріванні. Він також може слугувати гарніром, додаючи хрускоту верхівкам кексів.

На відміну від рафінованого, барбадоський цукор або мусковадо — це нерафінований тростинний цукор із природною патокою. Він буває темним або світлим, має липку та вологу текстуру, пісочний склад і насичений, багатогранний аромат із карамельними нотками. Мусковадо часто використовують як замінник коричневого цукру, але його смак значно інтенсивніший. Він ідеально підходить для соусів для барбекю, маринадів, пікантних страв, заправок для салатів, а також для випічки: тістечок, пряників, шоколадного печива, вівсяних пластівців і морозива. Його можна додавати навіть у гарячу каву, щоб надати комплексної солодкості, яка підкреслює гіркуватий смак напою.

Цукор ***демерара*** походить із британської колонії Демерара, нині територія Гайани. Його отримують із цукрової тростини з мінімальною обробкою, завдяки чому кристали зберігають натуральний аромат патоки. Демерара має великі бурштинові кристали, хрустку текстуру та м'який, карамельний смак. Його широко використовують для підсолоджування напоїв, таких як кава чи чай, а також як начинку або посипку у випічці — кексах, булочках, печиві, тістечках. Крім того, його застосовують для створення хрусткої верхівки десертів, наприклад, крем-брюле.

Кокосовий цукор за зовнішнім виглядом нагадує коричневий цукор і відзначається насиченим карамельним смаком. Його виготовляють у Південно-Східній Азії із соку квіткових пагонів кокосової пальми. Оскільки цей цукор проходить мінімальну обробку, він зберігає частину природних вітамінів та мінералів. Однак, щоб отримати помітну користь для здоров'я, потрібно споживати його у великих кількостях, що, як правило, не рекомендується через високий вміст цукру.

Цукор turbinado подібний до демерара і проходить мінімальну обробку, щоб бути придатним для споживання. Він характеризується світлим відтінком, великими кристалами та м'яким смаком, схожим на коричневий цукор. Turbinado має легкий карамельний аромат і часто використовується для підсолоджування

гарячих напоїв або у випічці. Крім того, він містить більше патоки, ніж більшість інших сортів цукру, що додає йому характерної солодкості та насиченості смаку.

Рідкий цукор – це білий цукровий пісок, повністю розчинений у воді для отримання сиропу. Він переважно застосовується в напоях, а також у різних харчових продуктах, таких як джеми, соління та варення. Рідкий цукор можна легко приготувати й вдома, проте варто звернути увагу, щоб усі кристали цукру повністю розчинилися, інакше сироп може залишитися трохи каламутним.

1.7. Класифікація цукру за допомогою цифрових зображень і методів розпізнавання образів

Останніми роками зростає попит на більш якісні вхідні матеріали та інгредієнти як серед споживачів, так і в харчовій промисловості. Цукор займає особливе місце серед них, будучи ключовим компонентом у різних секторах харчової промисловості — напоях, безалкогольних напоях, кондитерських виробах, макаронних виробах, а також у продажу безпосередньо споживачам через супермаркети. Одним із важливих показників якості цукру є його забарвлення, яке зазвичай оцінюють у одиницях ICUMSA (Міжнародна комісія з уніфікованих методів аналізу цукру). Суть цього показника полягає в тому, що чим світліший цукор, тим нижчий його показник кольоровості, тоді як темніший цукор потребує більшої витрати для отримання бажаного кольору у виробах.

Рафінований цукор-пісок відзначається найнижчою кольоровістю серед усіх видів цукру, і досягнення цього результату потребує ефективного видалення барвників, що надходять із сировини. Серед цих барвників — хлорофіли ($C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$ та $C_{55}H_{70}O_6N_4Mg$), які надають зеленого кольору через їхню роль у фотосинтезі, а також каротини ($C_{40}H_{56}$) та ксантофіли ($C_{40}H_{56}O_2$), що обумовлюють жовтувате забарвлення. Крім того, до складу барвників входять флавоноїди — флавони, флавоноли, халкони, катехіни та антоціани, які мають загальну структуру C_6-C_3-C_6. Їхній колір залежить від pH середовища, що впливає на зовнішній вигляд цукру та його якість у переробці.

Флавоноїди — це група поліфенольних сполук рослинного походження, які відомі своїми антиоксидантними властивостями. Вони широко поширені у фруктах, овочах, чаї, винах та інших рослинних продуктах. У рослин вони виконують захисну функцію, оберігаючи від шкідливих впливів навколишнього середовища, а для людини флавоноїди корисні тим, що допомагають зменшувати окислювальний стрес, боротися із запаленнями та підтримувати загальний стан здоров'я.

Вони можуть демонструвати різні відтінки — від жовтого, фіолетового та синього до червоного або навіть прозорого. Наприклад, флавони у лужному середовищі набувають зеленувато-жовтого забарвлення, тоді як антоціани, що містяться в цукровій тростині, стають червоними в кислому середовищі та безбарвними у лужному. Крім того, деякі фенольні сполуки здатні утворювати кольорові комплекси з залізом, яке часто зустрічається у великій кількості на промислових об'єктах.

Під час обробки цукрової тростини ферментативне окислення фенольних сполук під дією поліфенолоксидаз може призводити до утворення барвників, таких як меланіни. Крім того, у процесі виробництва цукру може відбуватися реакція Майяра, що спричиняє утворення меланоїдинів.

Реакція Майяра, або реакція утворення меланоїдинів, полягає у взаємодії амінокислот з редукуючими цукрами під дією високої температури, що призводить до утворення забарвлених сполук (меланоїдинів) та ароматичних компонентів. Ця реакція відіграє важливу роль у приготуванні їжі.

Реакції сприяють такі фактори, як наявність відновлювальних цукрів і азотистих сполук, оптимальні температура та pH, а також тривалі етапи витримки. Високі температури додатково стимулюють карамелізацію цукрів, що сприяє формуванню забарвлення. Крім того, відбувається утворення продуктів лужного розпаду гексоз — коричнево-жовтих сполук, які формуються внаслідок полімеризації карбонових кислот і утворення полікарбонових ланцюгів під час лужного розкладу моносахаридів, таких як глюкоза та фруктоза.

Для цілей роздрібного маркетингу бразильське законодавство визначає, що цукор із показником кольору до 60 МО відноситься до категорії рафінованого.

Цукор із показником кольору вище 60 МО класифікується як нерафінований. У межах класу рафінованого цукру зразки, призначені для експорту, не повинні перевищувати 45 МО. Зразки з показником кольору від 46 до 60 МО відповідають бразильському законодавству, але не підходять для зовнішнього ринку. У цьому дослідженні такі зразки названі «зразками рафінованого цукру, що продаються в роздріб».

Класичні аналітичні методи оцінки якості цукру мають певні обмеження, серед яких руйнування зразка, високі витрати на реагенти та витратні матеріали, проблеми з утилізацією відходів і тривалий час проведення аналізу. Для подолання цих недоліків у науковій літературі запропоновано різні аналітичні підходи для визначення параметрів якості цукру. Серед них виділяють: спектроскопію збудження флуоресценції для оцінки кольору та вмісту золи; визначення Брікса та сахарози за допомогою спектрів трансфлексії; а також аналіз розчинних твердих речовин, вологи, золи, каламутності та кольоровості із застосуванням високоефективної рідинної хроматографії, газової хроматографії з полум'яно-іонізаційним детектором або мас-спектрометрією та атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно пов'язаною плазмою.

> **Brix (Брікс), або Balling (Боллінг),** — це американська одиниця вимірювання вмісту цукру у винограді, яка приблизно відповідає подвоєному значенню потенційного вмісту алкоголю за умови повного бродіння цукру.

Аналітичні методи, що використовують цифрові зображення у поєднанні з хемометричними інструментами, запропоновані як альтернатива традиційним еталонним методам для класифікації у харчовому аналізі. Такі підходи забезпечують простий, економічний і неруйнівний аналіз зразків без застосування реагентів.

Сучасна аналітична методологія пропонує використання цифрових зображень у поєднанні з багатовимірним аналізом для класифікації зразків цукру за їх кольором. На першому етапі проводиться розділення рафінованих і нерафінованих зразків. Для задоволення вимог зовнішніх споживачів класифікація була розширена до трьох окремих класів. Було розроблено

багатовимірні моделі класифікації на основі дискримінантного аналізу часткових найменших квадратів та лінійного дискримінантного аналізу, які порівнювалися за чутливістю, специфічністю та точністю прогнозів.

Зразки цукру зазвичай сприймаються як білі кристали, що ускладнює визначення їхнього класу лише за візуальним оглядом, особливо при розмежуванні рафінованого та нерафінованого цукру. Рафінований цукор відзначається найнижчими показниками кольору за шкалою ICUMSA, що відповідає його високій чистоті. Підвищення кольору зразка (пожовтіння) пов'язане з наявністю пігментів, що походять із цукрової тростини.

1.8. Функціональні властивості цукру

Сьогодні існує багато видів цукру, які широко застосовуються у харчовій промисловості. Він володіє унікальними властивостями, що окремо або в комбінації роблять його важливим інгредієнтом сучасної кухні. Без цукру варення швидко псувалося, морозиво кристалізувалося, а хліб втрачав свіжість і висихав. Крім того, цукор підсилює природні смакові відтінки, роблячи страви більш виразними.

Солодкість. Основними функціями цукру в харчових продуктах є надання солодкого смаку та енергії. Людське відчуття смаку включає чотири базові смаки: солодкий, кислий, солоний і гіркий. Солодкий смак є першим, який людина відчуває (наприклад, у грудному молоці), і зазвичай сприймається позитивно. Схильність до солодкого також пояснюється тим, що в природі солодкі продукти рідко є токсичними, на відміну від багатьох гірких речовин.

Солодкість цукру характеризується чистим смаком без сторонніх присмаків і оцінюється лише суб'єктивно через смакові рецептори язика, які передають сигнали до мозку. На відчуття солодкого впливають концентрація підсолоджувача, температура, pH, наявність інших інгредієнтів, індивідуальна чутливість, а також суб'єктивні фактори, такі як зовнішній вигляд і колір продукту.

Для того, щоб речовина відчувалася солодкою, вона повинна бути розчинною у воді, а її концентрація перевищувати поріг смаку. У харчових продуктах підсолоджувачі зазвичай застосовують у концентраціях, значно вищих за цей поріг. Інтенсивність солодкості підсолоджувача визначають за допомогою показника відносної солодкості — міри того, наскільки речовина солодка порівняно з сахарозою у розчині порівняння (зазвичай 5–10%). Звичайний цукор приймається за одиницю порівняння (1). Натуральні сорти цукру мають низьку відносну солодкість у порівнянні з високоінтенсивними підсолоджувачами, які можуть бути у сотні разів солодшими за звичайний цукор.

Смак і аромат. Цукор важливий тим, що може підсилювати смак і аромат продуктів навіть при концентраціях нижче порогового рівня солодкості. Наприклад, невелика кількість цукру здатна посилити смак кислих або гірких страв. Ця властивість використовується в багатьох харчових продуктах, таких як хліб або фруктові вироби. Додавання невеликої кількості цукру також покращує смак варених овочів і м'яса, не роблячи їх солодкими, тобто цукор може виконувати функцію ароматизатора при низьких концентраціях.

Об'єм. Цукор впливає на вагу та об'єм харчових продуктів. Він має незначний ефект на об'єм рідин, але значно впливає на об'єм хлібобулочних виробів. У хлібі цукор підсилює об'єм, оскільки дріжджі розщеплюють цукор або сироп, утворюючи різні продукти, зокрема вуглекислий газ, який робить хліб більш пористим. У бісквітних тістечках і кексах цукор також сприяє збільшенню об'єму завдяки своїй фізичній присутності. Якщо цукор виключити з рецептури, енергетична частка жиру в продукті збільшиться.

Текстура. Текстура відображає відчуття продукту у роті. Цукор впливає на неї, забезпечуючи об'єм і консистенцію таких продуктів, як хліб, варення та напої. У хлібі цукор прискорює бродіння, що робить тісто більш пористим і м'яким. При виготовленні джемів, желе та інших фруктових продуктів важливо дотримуватися правильного співвідношення цукру, пектину та кислоти. Цукор у поєднанні з пектином сприяє утворенню гелю, що визначає консистенцію продукту. Надмірна кількість цукру може призвести до кристалізації, а його

нестача — до порушення гелеутворення. Неправильне значення pH також впливає на стабільність желе: високий pH перешкоджає повному утворенню гелю, а низький — робить його нестійким і рідким.

У поєднанні з фруктовим пектином і кислотами у правильних пропорціях цукор забезпечує желе, мармеладу та джему необхідну консистенцію. Деякі фрукти з низьким вмістом пектину можуть вимагати додаткового пектину для досягнення бажаної структури. Цукор також важливий для визначення складу напоїв, тобто їхньої насиченості, що впливає на відчуття в роті та сприйняття смаку.

Термін зберігання. Консервуючі властивості цукру застосовуються в продуктах, таких як джеми, соки та маринади. Консервація запобігає росту мікроорганізмів, що руйнують продукт, і зменшує ризик патогенних бактерій, здатних викликати хвороби. Для росту мікроорганізмам необхідна вода, яку вони поглинають через клітинну оболонку. Якщо концентрація цукру в продукті досягає певного рівня, вода зв'язується цукром, зменшуючи її доступність і активність, що пригнічує ріст мікроорганізмів.

Додавання цукру у розчин підвищує осмотичний тиск, що обмежує розвиток мікроорганізмів. Оптимальне поєднання факторів, таких як pH, активність води та температура, дозволяє зменшити використання консервантів, а цукор відіграє при цьому ключову роль. Зв'язуючи воду, цукор знижує її активність — чим менша активність води, тим довше зберігається продукт, адже мікроорганізми виживають лише у «вільній» воді. Наприклад, додавання 500 г цукру на кг ягід або м'якоті відповідає активності води 0,97, а 1 кг цукру на кг ягоди знижує її до 0,92. При кип'ятінні такої суміші ця концентрація цукру ефективно пригнічує розвиток цвілі.

Ферментація. Процес бродіння застосовується століттями для виробництва та збереження харчових продуктів. Він часто передбачає використання дріжджів та вуглеводів, зокрема цукру, як джерела енергії. У хлібопекарстві невелика кількість цукру додається до тіста для стимулювання дріжджів, які починають виробляти вуглекислий газ. Під час випічки дріжджі за

допомогою ферментів перетворюють цукор на спирт і вуглекислий газ, тому цукор не завжди залишається у готовому продукті. Навіть невелика кількість цукру або сиропу пришвидшує та підвищує ефективність бродіння дріжджів. Вуглекислий газ забезпечує підняття тіста та пористу структуру хліба.

Зниження точки замерзання. Цукор впливає на температуру замерзання продуктів: чим вища його концентрація, тим нижча температура замерзання. Це особливо важливо для морозива та заморожених десертів, оскільки зниження точки замерзання зменшує утворення великих кристалів льоду. Дрібні кристалики льоду покращують відчуття продукту у роті та підсилюють смак. Зниження точки замерзання залежить від кількості молекул на одиницю ваги, тому глюкоза, фруктоза та інвертний цукор ефективніше знижують температуру замерзання порівняно зі звичайним сахарозним цукром.

Колір. Цукор може надавати харчовим продуктам привабливий колір завдяки карамелізації, реакції Майяра або здатності зберігати колір. Реакція Майяра — взаємодія цукру з амінокислотами — призводить до підрум'янювання та утворення аромату у продуктах, таких як хліб, кава, гарячі десерти та тістечка. Це складний процес, кінцеві продукти якого забезпечують забарвлення та аромат. Карамелізація відбувається при нагріванні розчину цукру вище 100 °C і характеризується термічним розкладом цукру. Ступінь карамелізації залежить від температури та pH: молекули цукру розщеплюються, утворені продукти взаємодіють між собою, з водою та ще не розщепленим цукром, формуючи коричневі солодкі молекули. На карамелізації базуються продукти на кшталт карамельного соусу. Крім того, певний вміст цукру сприяє збереженню кольору варення та джему.

Збереження вологи. Цукор здатен зв'язувати воду, що сповільнює реакції, які залежать від її наявності. У хлібі це сприяє довшому утриманню вологи та подовженню терміну придатності. У продуктах з низьким вмістом води та високим вмістом цукру, таких як печиво чи варені цукерки, відносна вологість нижча за навколишнє середовище, тому без захисної упаковки вони поглинають вологу з повітря.

Здатність цукру утримувати воду залежить від співвідношення кристалізованого та розчиненого цукру. Будь-які зміни цього співвідношення під час виробництва або зберігання впливають на кількість води, яку продукт може зв'язати. Тістечка та хліб, приготовані з сиропами, залишаються більш вологими та довше зберігаються порівняно з продуктами на основі звичайного цукру. Це пов'язано з наявністю фруктози у сиропі, яка зв'язує більше води, ніж сахароза.

Цукор виконує багатофункціональну роль у харчових продуктах: надає солодкість, покращує смак і аромат, впливає на текстуру та об'єм, знижує точку замерзання, сприяє збереженню кольору і вологи, а також подовжує термін зберігання. Його фізико-хімічні властивості роблять його незамінним інгредієнтом у сучасній харчовій промисловості.

Питання для самоконтролю

1. Які існують види сировини для промислового виробництва цукру?
2. Що собою являють моно- і полісахариди?
3. Що собою представляють цукрові буряки?
4. Які продукти є напівфабрикатами у цукровому виробництві?
5. З яких компонентів складається дифузійний сік?
6. Що таке дефекація?
7. Що таке сатурація?
8. Що таке сульфітація?
9. Які рослини слід вважати рослинами-цукроносами?
10. Які речовини відносяться до нецукрів?
11. Що таке утфель?
12. Що собою представляє цукрова тростина?
13. Що таке цукрове сорго і цукровий клен?
14. Які специфічні властивості притаманні глюкозі, фруктозі, галактозі, сахарозі?
15. Що таке білий цукровий пісок, яким він буває?
16. Що таке коричневий цукор, яким він буває?

17. Які аналітичні методи використовують для аналізу властивостей цукру?

18. У чому полягають функціональні властивості цукру?

Рекомендована навчальна література

1. Технологія цукру = Sugar technology : підручник : у 3 т. Т. 1 : Вирощування, зберігання цукрових буряків, видобування сахарози / А. А. Ліпєц, В. М. Логвін, К. Д. Скорик та ін. ; за ред. В. М. Логвіна, А. І. Українця. Київ : Експрес-об'ява, 2015. 288 с.

2. Технологія цукру = Sugar technology : підручник : у 3 т. Т. 2 : Очищення дифузійного соку / А. А. Ліпєц, В. М. Логвін, К. Д. Скорик та ін. ; за ред. В. М. Логвіна, А. І. Українця. Київ : Експрес-об'ява, 2015. 272 с.

3. Технологія цукру = Sugar technology : підручник : у 3 т. Т. 3 : Кристалізація / А. А. Ліпєц, В. М. Логвін, К. Д. Скорик та ін. ; за ред. В. М. Логвіна, А. І. Українця. Київ : Експрес-об'ява, 2015. 208 с.

4. Тютюнник Ю. Г. Цукроварні України. Індустріальна спадщина і ландшафт : монографія / Ю. Г. Тютюнник ; Ін-т еволюційної екології НАН України. Київ : АБС Пресс, 2016. 330 с.

5. Бобрівник Л. Д., Логвін В. М. Хімічні процеси виробництв сахаридів : монографія. Київ : Експрес-Поліграф, 2014. 268 с.

6. Цукрова промисловість: традиції та інновації. Вітчизняний та світовий досвід : наук.-допом. бібліогр. покажч. / упоряд. О. В. Олабоді ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. Київ, 2018. 92 с.

7. Рева Л. П. Фізико-хімічні основи технологічних процесів очищення дифузійного соку у виробництві цукру : монографія. Київ : НУХТ, 2015. 371 с.

Розділ 2. ІННОВАЦІЇ У ВИРОБНИЦТВІ ЦУКРОВОЇ ПУДРИ, РІДКОГО ЦУКРУ, РОЗЧИНЕНИХ ЦУКРОВИХ ПОРОШКІВ

2.1. Відомості про цукрову пудру

Цукрова пудра — це дуже дрібно змелений цукор, який отримують із кристалічного цукру. Вона відзначається однорідною, м'якою порошкоподібною структурою та вираженим солодким смаком, тому широко використовується для оздоблення кондитерських виробів, приготування глазурі та підсолоджування напоїв. Цей продукт є важливою складовою багатьох рецептів випічки, оскільки надає виробам делікатної солодкості й більш ніжної консистенції.

Попри те, що цукрова пудра швидко забезпечує організм енергією завдяки значній кількості вуглеводів, вона практично не містить цінних поживних речовин. Надмірне споживання цукру може призводити до набору маси тіла, розвитку карієсу та підвищення ймовірності виникнення хронічних хвороб, зокрема діабету й серцево-судинних патологій. Тому її варто вживати помірно, дотримуючись принципів збалансованого харчування.

Цукрова пудра не належить до продуктів здорового харчування, однак за помірного споживання може мати певні особливості та умовні переваги:

Швидке джерело енергії — як простий вуглевод, вона швидко забезпечує організм енергією.

Низький вміст натрію — продукти з невеликою кількістю натрію сприяють підтриманню нормального артеріального тиску.

Без глютену — підходить для людей із непереносимістю глютену або целіакією.

Універсальність у використанні — завдяки дрібній текстурі добре підходить для різних кулінарних цілей і розширює можливості в приготуванні страв.

Легке засвоєння — простий склад сприяє швидкому перетравленню.

Покращення смаку — додає стравам виразної солодкості.

Естетичний ефект — використовується для декорування десертів, надаючи їм привабливого вигляду.

Водночас важливо пам’ятати, що основою продукту є цукор, тому вживати його слід обмежено в межах збалансованого раціону.

2.2. Історія та передумови появи цукрової пудри

Цукрова пудра має давню історію, що бере початок із розвитку цукрового виробництва. Відомо, що виготовлення цукру в Індії практикували ще близько 500 року до н.е. Згодом арабські майстри вдосконалили технології очищення та рафінування цукру, що стало підґрунтям для появи його тонкоподрібнених форм, зокрема цукрової пудри. Уже до XII століття цукрове виробництво поширилося в Європі, де цей продукт поступово набув популярності та почав широко використовуватися в кулінарії.

Щоб цукрова пудра не втрачала свої властивості, її слід тримати в щільно закритій тарі в сухому й прохолодному місці, подалі від сонячного світла. Дотримання таких умов зберігання запобігає утворенню грудок, вбиранню вологи та сторонніх запахів, завдяки чому продукт зберігає якість і завжди залишається придатним до використання.

Цукрова пудра буває різних видів, які відрізняються тонкістю помелу та наявністю додаткових інгредієнтів, що впливають на її властивості та застосування в кулінарії:

Пудра 10Х (десятикратного помелу) — це надзвичайно дрібний цукор, який легко розчиняється і створює ідеально гладку текстуру. Найчастіше використовується для приготування глазурі, кремів, мусів та інших кондитерських виробів, де важлива однорідність і ніжність.

Пудра 6Х (шестикратного помелу) — має трохи грубішу структуру, ніж 10Х, завдяки чому підходить для посипання випічки, приготування печива або страв, де не потрібна ідеально гладка текстура. Вона також добре зберігає форму при приготуванні деяких десертів.

Цукрова пудра з кукурудзяним крохмалем — містить невелику кількість крохмалю, що запобігає злипанню кристалів і утворенню грудок. Такий вид

пудри зручний для зберігання та використання у будь-яких рецептах, де важлива суха, порошкоподібна консистенція.

Кожен вид цукрової пудри має свої переваги, і правильний вибір залежить від того, для яких кулінарних цілей її планується використовувати.

2.3. Особливості помелу цукру

Лінія для помелу цукру включає кілька взаємопов'язаних вузлів, які забезпечують ефективне та якісне виробництво цукрової пудри:

Силос для кристалічного цукру — служить для зберігання сировини перед обробкою.

Система розвантаження, подачі та дозування цукру — забезпечує рівномірне надходження цукру з мішків насипом або з кінчиків мішків до млина.

Дозувальний накопичувальний вузол — запобігає грудкуванню цукру та додає крохмаль (кукурудзяний або картопляний) у кількості від 1,5 до 3%, що покращує сипкість кінцевого продукту.

Штифтовий млин — подрібнює цукор до порошкоподібної текстури.

Молотильний бункер — накопичує подрібнений цукор перед його транспортуванням далі по лінії.

Відсмоктувач цукрової пудри та пиловловлювальний агрегат — забезпечують збір пилу та запобігають його розсіюванню, підтримуючи чистоту на виробництві та якість продукту.

Усі ці елементи працюють разом, забезпечуючи безперервний процес виробництва цукрової пудри з високою якістю та однорідною текстурою.

Один із прикладів технологічного обладнання для виробництва цукрової пудри показано на рис. 6. Для подрібнення цукру застосовується штифтовий млин з обертовими пластинами, який дозволяє значно зменшити розмір кристалів і отримати однорідну порошкоподібну структуру. Контроль вологості під час процесу подрібнення забезпечується дозуванням крохмалю за допомогою шнекового живильника, а також використанням молотильного бункера. Бункер, розмір якого підбирається відповідно до моделі PalSugarIce®, виконує функцію

температурного буфера для свіжозмеленого цукру. Перемішування цукрової пудри всередині бункера здійснюється за допомогою обертового блока з прямими лопатями, що гарантує однорідність продукту та запобігає утворенню грудок.



Рис. 6. Млин для виробництва цукрової пудри PalSugarIce® Франція [8]

Лінії помелу PalSugarIce® від компанії Palamatic широко застосовуються у промислових шоколадних фабриках, цукрових заводах, великих пекарнях, а також у кондитерській промисловості. Цукрова пудра, вироблена на цих лініях, відзначається високою якістю та підходить для виготовлення таких продуктів, як безе, жувальна гумка, шоколад, морозиво, глазур, нуга, макарони та карамель.

Лінія PalSugarIce® сертифікована відповідно до стандарту ATEX 20-22, що гарантує безпеку при роботі в умовах потенційно вибухонебезпечного середовища. Обробка повітря та керування системою пилозбірника повністю інтегровані завдяки наявності фільтрувального вузла, що забезпечує чистоту виробничого процесу та оптимальні умови для роботи обладнання.



Рис. 7. Відомі моделі технологічного обладнання виготовлення цукрової пудри [9]

Таблиця 4 – Технічні характеристики технологічного обладнання виготовлення цукрової пудри

Показник	Моделі			
	UM160	UM315	UM500	UM630
Потужність, кВт	5.5	18,5	37	75
Теоретичний потік, м³/год *	250	1000	2000	3600
Коефіцієнт масштабування	0,25	1	2	3

**Ці швидкості потоку наведено для виробництва цукрової пудри з розміром пористості < 130 мкм для 98%.*

Переваги обладнання PalSugarIce® включають:

Гнучка конфігурація дизайну — лінію можна адаптувати під наявний виробничий простір.

Зручний доступ до шліфувальної камери — забезпечується відкидними дверцятами та можливістю заміни шліфувальних тіл, що полегшує обслуговування та чистку.

Посилена конструкція вхідного отвору подачі — дозволяє працювати на високих обертах та забезпечує пилонепроникне ущільнення.

Подрібнення наддрібних частинок — гарантує отримання цукрової пудри однорідної та тонкої текстури.

Регульована кількість рядів штифтів — дає змогу контролювати інтенсивність подрібнення та кількість ударних поверхонь, адаптуючи процес під різні вимоги рецептури.

2.4. Рідкий цукор

Якщо у більшості фінікових продуктів фініковий смак, натуральний чи модифікований, є невід'ємною складовою, то рідкий цукор з фініків представляє собою використання фініка як джерела цукру, подібно до цукрового буряка чи тростини. У цьому контексті важливо оцінити його корисність та економічність порівняно з іншими джерелами цукру.

Щодо врожайності на гектар, фініки демонструють досить пристойні показники: добре доглянута плантація з 125 пальм на гектар і середньою врожайністю 100 кг фініків на пальму (60% цукру) дає близько 7,5 тон цукру з гектара. Для порівняння, врожайність цукрового буряка приблизно на тому ж рівні, тоді як тростинний цукор може досягати 25 тон/га. Проте конкурентні позиції фініків обмежуються складністю механізованого вирощування в порівнянні з буряковим або тростинним цукром.

Ще один фактор — склад цукру фініків. У плодах не міститься чистої сахарози; більшість цукру — це інвертний цукор, тобто приблизно рівні частини глюкози та фруктози. Ці цукри важко перетворити на кристалічну форму, і вони не такі зручні у побутовому використанні, як сахароза. Тому фініковий цукор найбільш доцільно використовувати у вигляді рідкого цукру на промисловому рівні, конкуруючи з рідкими продуктами із сахарози, кукурудзяного сиропу та сиропів з високим вмістом фруктози.

Фініковий сироп є основним продуктом, що отримується з фініків, і його використання належить до найдавніших практик виробництва підсолоджувачів. У харчовій промисловості його додають до джемів, мармеладу, концентрованих напоїв, шоколаду, морозива, кондитерських виробів та меду.

Фініковий сироп містить не лише високий рівень цукру, а й мінерали (калій, залізо, магній, кальцій), вітаміни (тіамін B_1, рибофлавін B_2, нікотинову кислоту, А та С) і володіє вираженою антиоксидантною активністю, головним чином завдяки фенольним сполукам. Крім того, він багатий на ненасичені жирні кислоти, такі як олеїнова, лінолева, пальмітолеїнова та ліноленова кислоти.

У підсумку, рідкий фініковий цукор та сироп є не тільки джерелом солодкості, але й цінним нутрієнтним продуктом із широким спектром харчового і промислового застосування.

Третє обмеження у використанні фінікового цукру пов'язане з економією масштабу. Промисловий процес його виробництва характеризується високими інвестиційними витратами та багатоступеневою технологією, що робить виробництво надзвичайно чутливим до обсягів. У такому випадку виробничі витрати значно зменшуються лише при збільшенні потужностей, що обмежує ефективність малих або середніх виробництв.

Отже, з огляду на наведені обмеження, прибуткове використання фініків як джерела цукру можливе лише за певних умов: наявність великого обсягу фініків, що перевищує потреби місцевого споживання, а також існування ринку для промислового рідкого цукру при низькій або відсутній конкуренції з аналогічними місцевими джерелами сировини.

Більшість країн-виробників фініків не відповідають цим критеріям, за винятком Іраку, де протягом останніх тридцяти років розвивалася промислова галузь виробництва рідкого фінікового цукру.

Рідкий цукор має певні технологічні особливості та обмеження, особливо при невеликих обсягах виробництва, зокрема складності в обробці та дозуванні. Водночас він демонструє певні переваги порівняно із сахарозою: менше схильний до кристалізації в готових продуктах і здатний утримувати вологу завдяки своїй гігроскопічності.

Проте аналогічні властивості має й рідкий інвертний цукор, отриманий із сахарози, що створює конкуренцію. В результаті економічна доцільність виробництва рідкого цукру з фініків значною мірою залежить від витрат на

виробництво та сировину та визначає, чи існує на ринку достатня ніша для цього продукту.

На відміну від виробництва сахарози, де більшість нецукрових розчинних речовин залишається у маточному розчині, а чиста сахароза кристалізується, у виробництві рідкого фінікового цукру необхідно видаляти всі небажані нецукрові компоненти з фінікового соку. У порівнянні із сиропами, отриманими з тростини чи буряка, витрати на очищення фінікового сиропу значно вищі, оскільки процес включає кілька делікатних і дорогих операцій, таких як: хімічне очищення шляхом осадження; знебарвлення через адсорбцію; демінералізація за допомогою іонного обміну.

Рідкий інвертний цукор, у тому числі з фініків, може мати різний склад трьох основних цукрів (сахарози, глюкози, фруктози), але вимоги до чистоти та якості інших компонентів надзвичайно високі, особливо для виробництва напоїв та кондитерських продуктів. Навіть незначна присутність заліза може змінити смак, колір або pH шоколадного сиропу, а надто високий вміст золи легко впливає на ніжні смаки малини чи вишні.

Сироп має бути без запаху та кришталево прозорим, а також уникати кристалізації, яка створює проблеми при обробці, транспортуванні та використанні на заводах. Для цього важливий контроль комбінацій цукрів у сиропі: висока чистота рідкого цукру визначається зниженими точками насичення компонентів. Наприклад, розчинність чистого інвертного цукру становить 69,7 г/100 г (69,7°Bx), а суміш 50% сахарози і 50% інвертного цукру має точку насичення 77°Bx. У фінікових сиропах, де переважають дві гексози, точка насичення нижча, що підвищує ризик мікробної інфекції.

Усі ці особливості показують, що виробництво рідкого фінікового цукру має багато технічних складнощів. Понад двадцять років досліджень і техніко-економічних обґрунтувань знадобилося, перш ніж у кінці сімдесятих років в Іраку було засновано перший завод для промислового виробництва рідкого фінікового цукру.

Використання рідкого фінікового цукру зосереджене переважно на продуктах, де додавання фінікового сиропу для надання смаку чи кольору небажане. Основні сфери застосування включають: безалкогольні напої; світлі кондитерські вироби та тістечка; желе та фруктове варення; морозиво; інші кондитерські продукти, де потрібна солодкість без характерного смаку фініків. Таким чином, рідкий фініковий цукор дозволяє забезпечити солодкість і текстуру продукту, не впливаючи на його природний колір або аромат.

Дослідження з розділення глюкози та фруктози зосереджувалися на селективній адсорбції на спеціальних смолах, а також на перетворенні глюкози у фруктозу. Окрім ферментативної ізомеризації, тестувалося використання методу алюмінату натрію. Мета таких досліджень полягає у тому, що глюкоза та фруктоза мають різні фізико-хімічні властивості, які краще проявляються при використанні окремо: у суміші вони частково взаємно послаблюють свої специфічні якості.

Наприклад: Глюкоза має низьку розчинність (54,6 г/100 г), що дозволяє отримати сухий, стабільний кристалічний порошок, проте її солодкість на грам є найнижчою. Фруктоза, навпаки, високо розчинна, гігроскопічна, чутлива до тепла та менш стабільна, але вона має найвищу солодкість на грам, що робить її привабливою для продуктів із контролем калорійності.

Ці контрастні властивості пояснюють доцільність використання цих цукрів окремо. Прикладом часткового впровадження цієї концепції є кукурудзяний сироп з високим вмістом фруктози, де шляхом ферментативної обробки частина глюкози перетворюється на фруктозу. Це дозволяє: зменшити кристалізацію глюкози, підвищити солодкість на грам продукту, досягти вищої точки насичення розчину.

Таким чином, контроль співвідношення глюкози та фруктози дозволяє оптимізувати функціональні властивості цукру для різних харчових і промислових застосувань.

У цьому ж напрямі проводилися дослідження щодо виробництва твердих цукрів з фініків, проте перспективи отримати продукт, порівнянний із столовим

цукром (сахарозою), з самого початку виглядають обмеженими через дві ключові причини: обмежений вміст сахарози — навіть у кращих сортах вона становить лише близько половини від загальної кількості цукрів; гігроскопічність фруктози, яка є похідним компонентом сахарози, ускладнює отримання стабільного кристалічного продукту. Тому виробництво твердого цукру з фініків є технологічно складним і економічно невигідним у порівнянні зі стандартною сахарозою.

Деякі дослідники продовжували працювати над можливістю отримання твердого або кристалічного цукру з фініків, пропонуючи кілька підходів:

Цукрова паста – пропонується зупинятися на більш-менш білій пасті, схожій на кристалізований мед, яку упаковують у непроникну плівку. Такий продукт створює труднощі при дозуванні невеликими порціями на рівні споживача, але зберігає певну стабільність.

Кристалічний інвертний цукор – запатентований процес дозволяє отримати інвертний цукор з висококонцентрованого рідкого фінікового цукру, що забезпечує його подальше промислове використання.

Селективна кристалізація сахарози – експерименти з розчинністю і кристалізацією сахарози в етанолі (етиловому спирті) дозволяють виділити кристали сахарози приблизно 10% від маси фініків за допомогою водної етанольної екстракції, фільтрації, випаровування та кристалізації.

Бактеріальне селективне розщеплення – інший метод передбачає видалення глюкози та фруктози з розчину, залишаючи чисту сахарозу для кристалізації.

Сучасні технології дозволяють відділяти цукри зі змішаних розчинів та отримувати їх у вигляді сухих, рідких, кристалічних або аморфних продуктів. Фруктоза, хоча й складніша в обробці, також освоєна, і її часто використовують у фармацевтичних цілях або разом зі штучними підсолоджувачами.

Проте існують дві основні перешкоди для масштабного використання фініків у виробництві цукру:

Міжнародний рівень – сильна конкуренція з боку інших джерел цукру, таких як тростина, буряк і крохмаль;

Національний рівень – у країнах-виробниках фініків часто немає достатнього попиту або розміру ринку для таких продуктів, а також існують проблеми з альтернативною сировиною.

Ці фактори значною мірою обмежують комерційне використання фініків як джерела цукру, незважаючи на наукові та технологічні можливості.

2.5. Розчинний порошок фінікового цукру

Фінікова пальма (Phoenix dactylifera L.) є ключовою плодовою культурою в спекотних пустельних регіонах світу, зокрема на напівпосушливих та посушливих землях. Основною складовою фініків є вуглеводи (70–80%), переважно у формі глюкози та фруктози; 100 г плодів забезпечують понад 300 ккал енергії. Крім того, фініки містять білки, пектин, ліпіди, солі та мінерали, що робить їх досить поживними.

Річне споживання фініків значно відрізняється в різних регіонах: у південних провінціях Ірану воно становить близько 25 кг на душу населення, тоді як у Європейському Союзі у 2012 році зафіксовано лише приблизно 100 г на людину. Незважаючи на багатовікову історію вирощування, промислове використання фініків розвинулося значно повільніше, ніж інших сільськогосподарських культур.

Водночас споживання продуктів із високим вмістом цукру пов’язане з ризиком надмірної ваги, підвищеного рівня жирів у крові та високого артеріального тиску. Завдяки великій кількості природних цукрів у фініках, один із способів їхнього використання в харчовій промисловості — заміщення звичайного білого цукру в рецептурі продуктів, що дозволяє поєднати солодкість із додатковою харчовою цінністю.

З фініків можна отримати низку важливих харчових продуктів (рис. 8), таких як: фінікова паста, фініковий сироп, фініковий нектар, фініковий сік, борошно з фінікового насіння, ферментований фініковий концентрат.



Рис. 8. Фінікові сиропи [10]

Серед нових продуктів виділяється фініковий порошок, який отримують шляхом сушіння та подрібнення фінікової м'якоті або її сиропу. Існує кілька способів виробництва фінікового порошку, проте більшість з них базуються на використанні фінікової м'якоті, змішуванні її з антизлежувальними добавками, сушці комплексу у вакуумних сушарках та подальшому подрібненні до порошкоподібного стану.

У останні роки виробництво фінікового порошку привертає значну увагу дослідників та виробників. Основною метою є збільшення терміну придатності продукту та зменшення харчових відходів, проте більшість поширених методів є тривалими та призводять до продукції низької якості, що залишається основною технологічною проблемою.

Розпилювальне сушіння залишається одним із найпопулярніших методів виробництва порошку з фруктових соків завдяки кільком ключовим перевагам: економічність; гігієнічність; короткий час контакту, що сприяє збереженню харчової цінності вихідного продукту та високій якості кінцевого порошку.

Проте сушіння липких продуктів, таких як фруктові та овочеві соки, є складним через їх липкість до стінок сушарки та схильність до агломерації, що знижує ефективність виробництва. Основна причина — наявність низькомолекулярних цукрів (фруктоза, глюкоза, сахароза) та деяких органічних

кислот, які мають низьку температуру склування. Цю проблему можна подолати, додавши до розчинної сировини перед розпиленням біополімери, такі як: крохмаль та мальтодекстрин, камеді, білки або їх суміші.

Ці сполуки підвищують температуру склування, зменшують липкість порошку, створюють фізичний бар'єр між частинками та конкурують із ними за поглинання води, що дозволяє отримати стабільний та сипкий порошок високої якості.

Одним із популярних біополімерів у харчовій промисловості є мальтодекстрин, який широко використовується завдяки здатності утворювати плівку та високій температурі склування. Температура склування мальтодекстрину залежить від ступеня декстрозного еквівалента (DE): чим нижчий DE, тим вища температура склування; середньо вона становить близько 205 °C.

Проте великий об'єм мальтодекстрину може впливати не лише на якість продукту, а й на сприйняття споживачами та ринкові характеристики. Як альтернативу було запропоновано модифікацію поверхневих властивостей частинок білками, що потребує значно менше добавки для отримання порошку. Наприклад:

Для моделі продукту, багатого на цукор, достатньо 0,13% казеїнату кальцію та сироваткового білка, Тоді як для подібного ефекту з мальтодекстрином (DE = 6) потрібно понад 40%. Іншими словами, білкові комплекси сприяють виробництву порошку, зменшуючи поверхневий натяг між частинками, що підвищує ефективність сушіння.

Додатково, для зниження поверхневого натягу можна застосовувати низькомолекулярні поверхнево-активні речовини, наприклад емульгатори. Вони менші за білки та здатні глибше осідати на поверхні частинок. Проте через низьку температуру склування ці речовини не можуть використовуватися самостійно для покриття частинок і зазвичай застосовуються в комбінації з білками чи вуглеводами.

Пектин — це тип полісахариду, який складається з галактуронових кислотних одиниць, з'єднаних α (1–4) зв'язками, і здатний взаємодіяти з білками для утворення білок–полісахаридних комплексів. В останні десятиліття активно досліджували синергетичні взаємодії між білками та полісахаридами у харчових системах, таких як емульсії та піни.

Полісахариди впливають на властивості систем наступним чином: підвищують фізичну стабільність, збільшують в'язкість водної фази та змінюють реологічні властивості поверхні.

Поведінка біополімерів залежить від співвідношення білок–полісахарид, типу полісахариду, іонної сили, умов термічної обробки, а також розміру та заряду молекул.

Вплив pH на взаємодії білок–полісахарид можна охарактеризувати так:

Вищий за ізоелектричну точку: білки мають високий негативний заряд, що спричиняє електростатичне відштовхування між білками та аніонними полісахаридами.

Рівний ізоелектричній точці: катіонні області білків реагують з аніонними групами полісахаридів, утворюючи розчинні комплекси.

Нижче ізоелектричної точки: електростатичні взаємодії між білками та полісахаридами сприяють коацервації.

Нижче точки pKa аніонних груп полісахаридів: притягування між білками та полісахаридами послаблюється, і комплекс дисоціює.

Таким чином, pH є ключовим фактором, який контролює утворення, стабільність і дисоціацію білок–полісахаридних комплексів у харчових системах.

Моделювання Тагучі застосовується для визначення впливу різних факторів на властивості продукту та оптимальних умов їх комбінацій у галузі інженерії. Як альтернатива повному факторному моделюванню, метод Тагучі дозволяє значно зменшити кількість необхідних експериментів, роблячи процес простішим, швидшим та водночас точним і надійним, що економить час і знижує витрати.

Два основні інструменти цього методу:

Ортогональні масиви — допомагають оптимізувати експериментальний план і зменшити кількість повторюваних експериментів.

Дисперсійний аналіз (ANOVA) — оцінює вплив кожного фактора на характеристики продукту, дозволяючи визначити, які фактори є найбільш значущими.

Таким чином, метод Тагучі поєднує економічність та ефективність, забезпечуючи точну оптимізацію процесів при мінімальній кількості експериментів.

Існують численні дослідження, присвячені виробництву фінікового порошку за допомогою різних типів сушарок, і ключові результати таких робіт заслуговують на увагу.

Одним із підходів було сушіння фінікового сиропу у вакуумній печі з подальшим подрібненням висушених фініків. У дослідженні аналізували три сорти фініків із різним вмістом цукру, щоб оцінити можливість їх вакуумного сушіння за різних параметрів: товщина скибок, температура, тиск та час сушіння. Результати показали, що відсоток цукру, вологість фініків, товщина та умови сушіння безпосередньо впливають на властивості порошку, зокрема на його вологість. Оптимальні умови для отримання порошку з бажаними кольором і запахом були такими: температура 85 °C, тиск 54,6 см рт. ст., товщина 1 см, час сушіння 7 годин.

У попередніх дослідженнях оцінювали розпилювальне сушіння фінікового сиропу з комплексами сироваткового білка-пектину, і результати показали, що цей метод є перспективним для отримання порошку з покращеними фізико-хімічними властивостями.

Ще один підхід передбачав сушіння комбінованого комплексу фінікової м’якоті та мальтодекстрину у вакуумній печі. Було встановлено, що при змішуванні фінікової м’якоті з мальтодекстрином у співвідношенні 1:1 утворюється нелипкий порошок зі сприятливою сипучістю.

У інших дослідженнях оцінювали фізико-хімічні властивості та ізотерму сорбції порошку фінікового сиропу за впливу мальтодекстрину. Параметри сушіння включали двобарабанну сушарку, температуру 130 °C та декстрозний еквівалент мальтодекстрину 19, а рівень мальтодекстрину змінювали від 30 до 60%. Додавання мальтодекстрину покращувало деякі властивості продукту, підвищуючи легкість порошку, температуру склування та зменшуючи злежування.

Однак усі зазначені методи потребують тривалого часу та значної кількості полісахаридів, що негативно впливає на сприйняття продукту споживачами.

Тому метою сучасних проєктів є оптимізація фізико-хімічних властивостей фінікового порошку шляхом комбінованого використання білків, полісахаридів та поверхнево-активних речовин разом із застосуванням обладнання для розпилювального сушіння.

2.6. Виробництво порошку цукрового буряка

Через зростаючий попит споживачів на менш калорійні та функціональні інгредієнти, що мають корисні для здоров'я властивості, особливо для використання в шоколаді, какао-горіхових пастах, кондитерських виробах та молочних продуктах, дослідники шукають альтернативи традиційним підсолоджувачам, як калорійним, так і некалорійним (тобто рафінованому цукру та штучним підсолоджувачам).

Хоча в останні роки значну увагу приділено коренеплоду червоного буряка (Beta vulgaris L.), інформації про екстракт цукрового буряка та його потенційне застосування в харчових рецептурах недостатньо.

Щоб використати потенційну користь цукрового буряка для здоров'я та підвищити цінність кондитерських і солодких виробів, існує необхідність у розробці натурального функціонального порошку цукрового буряка, який добре поєднується з іншими порошковими інгредієнтами і може бути легко інтегрований у рецептури продуктів харчування.

Повідомлялося, що коренеплоди цукрового буряка містять функціональні інгредієнти з корисними властивостями, такими як антимікробна, антиоксидантна та антимутагенна активність.

Однак у процесі промислового виробництва цукру ці компоненти відокремлюються разом із мінералами, вітамінами, харчовими волокнами, фенольними сполуками, каротиноїдами, алкалоїдами, танінами, терпеноїдами, стероїдами та сапонінами. Внаслідок цього багаті на біологічно активні речовини складові видаляються, що знижує харчову та функціональну цінність кінцевого продукту.

Сушіння є одним із найпоширеніших методів консервування фруктів та овочів, а також забезпечує альтернативний вибір споживання в міжсезоння.

Перетворення харчових матеріалів у порошкоподібну форму має кілька переваг: покращений термін придатності, легкість транспортування та дозування, зменшені транспортні витрати, потреба в менших приміщеннях для зберігання.

Метод сушіння впливає на властивості порошку, такі як колір, форма, структура, а також харчові та нутрицевтичні характеристики.

Характеристики та поведінка порошку, наприклад текучість під час обробки та зберігання, визначаються як фізичними властивостями окремих частинок, так і властивостями сипучого порошку в цілому.

Розпилювальне сушіння, сублімаційне сушіння та сушіння в печі є найбільш відомими методами промислового виробництва порошків з рослинної сировини.

Розпилювальне сушіння широко використовується у харчовій промисловості завдяки низьким експлуатаційним витратам та можливості масштабного виробництва. Крім того, цей метод забезпечує швидке отримання порошку через короткий час обробки. Однак тепло, що застосовується для сушіння рідкого харчового матеріалу, може змінювати хімічну структуру та впливати на харчову якість кінцевого продукту.

Сублімаційне сушіння відбувається шляхом сублімації під високим вакуумом. Основною перевагою цього методу є здатність зберігати аромат і смак, а також мінімізувати втрати цінних компонентів, таких як вітаміни та біологічно активні речовини, завдяки низьким робочим температурам. До недоліків відносяться тривалий час операції та високі витрати на обробку.

Сушіння в печі – це традиційний метод, що застосовується при температурах 45–65 °C для сушіння рослинної сировини. Він може дещо впливати на аромат та колір продукту.

Порівняно з розпилювальним сушінням та сушінням у печі, сублімаційне сушіння забезпечує кращу якість порошку, особливо щодо збереження смаку, термочутливих сполук та кольору.

Отже, порошок цукрового буряка, що є потенційним джерелом біологічно активних сполук, харчових волокон та антиоксидантів, може бути використаний у харчових рецептурах як функціональний інгредієнт, підвищуючи харчову цінність і корисні властивості продуктів.

Питання для самоконтролю

1. Які основні фізичні та смакові властивості цукрової пудри?
2. Скільки існує різновидів цукрової пудри і чим вони відрізняються?
3. У чому полягають відмінності між різними ступенями помелу цукру?
4. Що таке інвертний цукор і як він відрізняється від звичайної сахарози?
5. Які переваги використання кукурудзяного сиропу у виробництві продуктів?
6. Що являє собою фініковий сироп і які його основні характеристики?
7. Які способи виготовлення фінікового порошку відомі на сучасному етапі?
8. Які особливості технологічного процесу виробництва цукрового порошку?
9. Які фактори впливають на якість порошку під час його сушіння?
10. Чим відрізняються методи розпилювального та сублімаційного сушіння?
11. Як використання біополімерів, білків та поверхнево-активних речовин впливає на властивості порошку?

12. Які переваги та недоліки рідкого цукру з фініків порівняно із сахарозою?

13. Яким чином відокремлюють глюкозу та фруктозу для промислового застосування?

14. Які харчові та функціональні властивості зберігаються у порошку цукрового буряка?

15. Для яких продуктів харчування фініковий сироп або порошок є найбільш придатним як інгредієнт?

Рекомендована навчальна література

1. Технологія цукру = Sugar technology : підручник : у 3 т. Т. 1 : Вирощування, зберігання цукрових буряків, видобування сахарози / А. А. Ліпєц, В. М. Логвін, К. Д. Скорик та ін. ; за ред. В. М. Логвіна, А. І. Українця. Київ : Експрес-об'ява, 2015. 288 с.

2. Технологія цукру = Sugar technology : підручник : у 3 т. Т. 2 : Очищення дифузійного соку / А. А. Ліпєц, В. М. Логвін, К. Д. Скорик та ін. ; за ред. В. М. Логвіна, А. І. Українця. Київ : Експрес-об'ява, 2015. 272 с.

3. Технологія цукру = Sugar technology : підручник : у 3 т. Т. 3 : Кристалізація / А. А. Ліпєц, В. М. Логвін, К. Д. Скорик та ін. ; за ред. В. М. Логвіна, А. І. Українця. Київ : Експрес-об'ява, 2015. 208 с.

4. Тютюнник Ю. Г. Цукроварні України. Індустріальна спадщина і ландшафт : монографія / Ю. Г. Тютюнник ; Ін-т еволюційної екології НАН України. Київ : АБС Пресс, 2016. 330 с.

5. Бобрівник Л. Д., Логвін В. М. Хімічні процеси виробництв сахаридів : монографія. Київ : Експрес-Поліграф, 2014. 268 с.

6. Цукрова промисловість: традиції та інновації. Вітчизняний та світовий досвід : наук.-допом. бібліогр. покажч. / упоряд. О. В. Олаботі ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. Київ, 2018. 92 с.

7. Рева Л. П. Фізико-хімічні основи технологічних процесів очищення дифузійного соку у виробництві цукру : монографія. Київ : НУХТ, 2015. 371 с.

8. Процеси і апарати. Механічні процеси і технології надвисокого тиску : підручник / В. С. Бойко, К. О. Самойчук, В. Г. Тарасенко та ін. Мелітополь : Люкс, 2019. 273 с.

9. Технологічні комплекси харчових виробництв : навч. посіб. / В. І. Теличкун, О. М. Гавва, Ю. С. Теличкун та ін. Київ : Сталь, 2017. 456 с.

Розділ 3. ЦУКРОВИЙ ПИЛ ЯК ПОТЕНЦІЙНА ЗАГРОЗА БЕЗПЕЦІ ЦУКРОВОГО ВИРОБНИЦТВА

3.1. Властивості цукрового пилу

Цукровий пил становить серйозну небезпеку для безпеки та здоров'я працівників у цукровій промисловості, а також створює ризик вибухів і пожеж. Його займистість пов'язана з дрібною структурою частинок, які легко піднімаються в повітря та можуть запалитися. Ефективне управління пилом є ключовим для забезпечення безпечного робочого середовища.

Основні фактори небезпеки цукрового пилу:

Розмір частинок. Цукровий пил складається з дрібних, легких частинок, які легко утворюють хмари у повітрі під час переробки, транспортування чи обробки. Такі хмари можуть спалахнути під впливом іскри, полум'я або гарячої поверхні.

Горючість. Дрібні частинки мають велику площу поверхні відносно об'єму, що забезпечує швидке горіння. Під час займання виділяється значна кількість тепла та газів, що підвищує ризик інтенсивної пожежі.

Збагачення киснем. Хмари пилу створюють середовище з підвищеним вмістом кисню, що прискорює горіння і робить пожежу більш інтенсивною.

Замкнене середовище. Вибухи пилу найчастіше трапляються у замкнутих або напівзамкнених просторах, де пил може накопичуватися до критичних концентрацій. Замкнене середовище сприяє швидкому наростанню тиску під час займання, що може призвести до вибуху.

Джерела займання. Потенційними джерелами займання є: електрообладнання, відкритий вогонь, гарячі поверхні, іскри від тертя та статичної електрики. Навіть невелике джерело може запалити пилову хмару та спричинити ланцюгову вибухову реакцію.

Історичні випадки. Відомі інциденти вибухів цукрового пилу на цукрових та харчових заводах підкреслюють необхідність ретельного управління ризиками та профілактики.

Для мінімізації ризиків необхідно контролювати концентрацію пилу, забезпечувати ефективну вентиляцію, уникати джерел займання та впроваджувати системи видалення пилу. Дотримання цих заходів дозволяє створити безпечні умови праці та зменшити ймовірність вибухів.

У цукровій промисловості цукровий пил становить серйозну небезпеку, оскільки його дрібні, легкі частинки легко піднімаються в повітря та утворюють займальні хмари, здатні до вибуху при контакті з джерелами займання, такими як відкритий вогонь, іскри або гарячі поверхні. Ризик загострюється через велику площу поверхні частинок, що прискорює горіння, а замкнені або напівзамкнені приміщення можуть підвищувати тиск і спричиняти вибухи. Крім того, під час переробки цукрових буряків стружка сушиться та гранулюється за температур до 750 °C, що додатково підвищує ймовірність займання. Для зменшення цих ризиків застосовують комплексні заходи контролю: пилозбірники та системи обробки повітря зменшують концентрацію пилу у виробничих приміщеннях, а регулярне та контрольоване прибирання запобігає його накопиченню на поверхнях та обладнанні. Поєднання технічних засобів і належних процедур є ключовим для забезпечення безпечного робочого середовища, запобігання вибухам та мінімізації пожежної небезпеки.

Сучасні технології, такі як електростатичні фільтри, високоефективні повітряні фільтри для частинок та самоочисні системи пиловловлення, демонструють великий потенціал для майбутнього управління цукровим пилом. Крім того, застосування штучного інтелекту та нанотехнологій може допомогти знизити концентрацію пилу на виробничих об’єктах. У галузі діють суворі правила та рекомендації щодо запобігання вибухам пилу, а впровадження надійних заходів безпеки та навчальних програм значно зменшує економічні та екологічні втрати, пов’язані з інцидентами. Розділ завершується рекомендаціями щодо подальшого вирішення проблем цукрового пилу: посилення регулювання, інвестиції в передові технології, активізація досліджень та покращення співпраці між зацікавленими сторонами галузі. Такі заходи дозволяють мінімізувати

ризики для працівників, забезпечити їхнє благополуччя та захистити стабільну діяльність цукрової промисловості.

Цукор є одним із наймасовіших товарів у світі, і у 2020 році його світове виробництво досягло приблизно 169 мільйонів метричних тон. Цукрова промисловість охоплює кілька ключових етапів: від вирощування та збору цукрової тростини або цукрового буряка до переробки та рафінування сировини у різні цукрові продукти, а також транспортування готової продукції на світові ринки. Основними регіонами виробництва цукрової тростини є Бразилія, Індія та Таїланд, тоді як цукрового буряка – Європейський Союз та Україна. Після збору врожаю сировина доставляється на переробні заводи, де проходить низку технологічних операцій для видалення домішок та отримання різних продуктів: цукру-піску, цукрової пудри, меляси тощо. Готова продукція потім транспортується на ринки світу за допомогою кораблів, вантажівок або залізниці.

Цукровий пил – це дрібні частинки цукру, які утворюються під час обробки та переробки цукрової сировини, зокрема при виробництві цукру-піску з цукрової тростини або буряка. Він виникає внаслідок механічних процесів, таких як подрібнення, просіювання кристалів, сушіння та переміщення цукру під час зберігання чи транспортування, наприклад при завантаженні або розвантаженні вантажівок, суден чи силосів. Через дрібну структуру та легкозаймистість частинок цукровий пил становить серйозну небезпеку: його накопичення може призвести до вибухів, що загрожують життю людей, здоров'ю працівників та стану обладнання. Крім вибухонебезпеки, пил здатний викликати проблеми зі здоров'ям, зокрема респіраторні захворювання, астму, а також подразнення шкіри та очей.

За останні роки цукрова промисловість зазнала кількох трагічних інцидентів, спричинених вибухами цукрового пилу. Наприклад, у вересні 2007 року на заводі групи Prodimex у Росії стався вибух, у результаті якого загинули три особи, а кілька працівників отримали поранення. У лютому 2008 року на Імперському цукровому заводі в Порт-Вентворті, штат Джорджія, США, вибух призвів до загибелі 14 осіб і травмування багатьох інших. Причиною вибухів

стало накопичення цукрового пилу на обладнанні та поверхнях, який потрапляв у повітря і займався. У листопаді 2007 року на силосі цукрового заводу Domino Sugar Refinery у Балтиморі, США, також стався вибух пилу; на щастя, смертельних випадків тоді не було. Ці події підкреслюють серйозну небезпеку цукрового пилу та важливість контролю його концентрації та ефективних заходів безпеки.



Рис. 9. Руйнування внаслідок вибуху на цукроварні (Імперський цукровий завод в Порт-Вентворті, штат Джорджія, 7 лютого 2008 року) [11]

У жовтні 2021 року на цукровому заводі Комати в провінції Мпумаланга, Південна Африка, сталася масштабна пожежа, внаслідок якої було знищено щонайменше 41 000 тон цукру. Вогонь підживлювався наявністю цукрового пилу на конвеєрній стрічці. Подібні інциденти відбулися раніше: у жовтні 2019 року на заводі Pioneer Mill компанії Wilmar Sugar Limited у Квінсленді, Австралія, і через місяць на Mackay Sugar Limited, де високі температури конвеєрних стрічок у поєднанні з цукровим пилом спричинили пожежу. У листопаді 2021 року на цукрово-етанольному заводі Usina Santa Lucia в Сан-

Паулу, Бразилія, наявність цукрового пилу також підживила вогонь під час пожежі на конвеєрі, що перевозив жом цукрової тростини. Ці випадки підкреслюють, що ризики, пов'язані з цукровим пилом, не можна ігнорувати, особливо для персоналу, відповідального за контроль і забезпечення якості, і акцентують на важливості ефективних заходів безпеки на підприємствах цукрової промисловості.

Цей розділ присвячено аналізу проблеми цукрового пилу в цукровій промисловості, оцінці існуючих заходів щодо його контролю та пропозиціям щодо подальшого зниження його концентрації на виробничих потужностях. Основними драйверами дослідження є прагнення забезпечити безпеку працівників, підвищити екологічну стійкість, дотримуватися нормативних вимог та оптимізувати операційну ефективність у процесі виробництва цукру. Надання поглибленого розуміння природи цукрового пилу та оцінка ефективності стратегій його управління дозволяє фахівцям, політикам і дослідникам приймати обґрунтовані рішення щодо зменшення ризиків. Аргументом на користь цього дослідження є необхідність мінімізації небезпеки для персоналу, зниження негативного впливу на довкілля, відповідності динамічним нормативним стандартам і підвищення ефективності промислових операцій. Важливо відзначити, що матеріал узагальнює та інтерпретує сучасні знання й передовий досвід галузі з метою визначення найкращих практик управління цукровим пилом.

3.2. Негативний вплив цукрового пилу

Цукровий пил, подібно до інших горючих пилів, здатний займатися та спричиняти вибухи. Коли дрібні частинки пилу потрапляють у повітря, вони можуть утворювати горючу суміш із киснем. За наявності джерела займання, наприклад іскри або гарячої поверхні, така суміш може спалахнути, спричинивши потужний вибух. У цукровій промисловості ризик вибуху особливо високий через великі обсяги оброблюваного та перероблюваного цукру. Цукровий пил накопичується на обладнанні та поверхнях, а під час

транспортування, пакування або подрібнення кількість пилу може значно зростати. Вибухи цукрового пилу становлять серйозну загрозу безпеці працівників і можуть завдати великої шкоди обладнанню та інфраструктурі заводу. Пожежі, викликані пилом, часто важко загасити та вони швидко поширюються по всьому виробничому об'єкту, що робить їх особливо небезпечними.

Цукрова промисловість особливо вразлива до вторинних вибухів, що значно підвищує ризики, пов'язані з цукровим пилом. Такі вибухи часто виникають після первинного спалаху, коли накопичений пил розсіюється в повітрі, створюючи потенційно горючу суміш. Джерела займання, пошкоджене обладнання або повторне накопичення пилу можуть виступати тригером для запуску вторинних вибухів, а їх поєднання підвищує ймовірність руйнівної ланцюгової реакції. Наслідки вторинних вибухів можуть бути катастрофічними: вони здатні завдати значної шкоди спорудам і обладнанню, а головне – становлять серйозну загрозу для життя і здоров'я працівників. Історія галузі свідчить про нагальну потребу у вживанні превентивних заходів для мінімізації цих ризиків і забезпечення безпечного виробничого середовища.

Вплив цукрового пилу на здоров'я працівників цукрової промисловості та на навколишнє середовище є значним і багатогранним. Вдихання пилу може спричиняти респіраторні проблеми, зокрема кашель, хрипи та утруднене дихання, а тривалий контакт підвищує ризик розвитку хронічного бронхіту та емфіземи. Працівники, зайняті завантаженням і розвантаженням цукру або обробкою мішків з цукром, а також ті, хто працює з обладнанням, що продукує пил, перебувають у зоні підвищеного ризику.

Вибухи цукрового пилу несуть серйозні економічні наслідки, включаючи пошкодження майна, необхідність заміни обладнання, судові витрати, компенсації працівникам та підвищення страхових внесків. Для малого бізнесу та компаній у країнах із недостатнім регулюванням безпеки ці наслідки можуть бути особливо руйнівними.

Крім того, вибухи та пожежі можуть значно шкодити навколишньому середовищу. Очищення та утилізація уламків від вибуху спричиняє викиди твердих частинок, що може негативно впливати на здоров'я місцевого населення. Використання води та хімікатів для гасіння пожежі може забруднювати джерела води та довкілля, спричиняючи довгострокові екологічні наслідки, зокрема руйнування природних середовищ існування та втрату біорізноманіття.

Окрім прямих витрат, необхідно враховувати й непрямі втрати — зупинка виробництва, зниження доходів, погіршення репутації компанії та потенційне зниження довіри інвесторів. Таким чином, цукровий пил є серйозним фактором ризику, що потребує комплексного управління для забезпечення безпеки працівників, стабільності виробництва та захисту навколишнього середовища.

3.3. Інноваційні ініціативи в цукровій промисловості щодо управління цукровим пилом

З огляду на високий ризик, пов'язаний із цукровим пилом, ефективні методи його збору та управління є критично важливими для зменшення небезпеки та захисту здоров'я працівників. Одним із основних засобів контролю пилу є використання пилозбірників, які призначені для захоплення та утримання частинок, що утворюються під час обробки цукру.

У цукровій промисловості застосовують різні типи пиловловлювачів. Рукавні фільтри є найпоширенішими та працюють за принципом утримання пилу на поверхні фільтрувальних мішків, які періодично очищаються для видалення накопиченого пилу. Циклонні сепаратори використовують відцентрову силу для відділення пилових частинок від повітря, а електростатичні фільтри застосовують електричний заряд для захоплення та збору дрібних частинок цукрового пилу.

Пиловловлювачі встановлюються у стратегічно важливих точках виробничого процесу, таких як конвеєрні перевантаження, силоси, пакувальні машини та всередині обладнання. Вони виконують подвійну функцію:

уловлюють пил, що може потрапити в повітря, та видаляють внутрішні накопичення на поверхнях і всередині машин.

Завдяки своєму ефективному функціонуванню пилозбірники значно знижують концентрацію цукрового пилу в повітрі, що не лише захищає працівників від шкідливого впливу пилу на дихальні шляхи, а й мінімізує ризик вибухів, підвищуючи загальну безпеку цукрового виробництва.

Ще одним ефективним заходом боротьби з цукровим пилом є використання систем обробки повітря, які забезпечують циркуляцію повітря у виробничих приміщеннях та видалення дрібних частинок пилу. Хоча такі системи допомагають підтримувати чистоту та безпечний рівень пилу, важливо розуміти їхні функції та обмеження.

Системи вентиляції, зокрема вентиляція приміщень, призначені передусім для обробки випадкових або незначних кількостей пилу, що надходить із місцевих пиловловлювачів, і не здатні видаляти великі обсяги пилу з виробничих зон. Основна їхня функція полягає в циркуляції повітря та створенні комфортних умов для персоналу.

Дотримання галузевих стандартів, таких як NFPA 654, є обов’язковим, оскільки вони визначають порядок запобігання пожежам та вибухам пилу під час виробництва та обробки горючих твердих речовин. Крім того, доцільно встановлювати високоефективні фільтри твердих частинок на вихлопних отворах вентиляційних систем як додатковий засіб для покращення якості повітря та зниження ризику поширення цукрового пилу.

Окрім застосування пиловловлювачів та систем обробки повітря, ефективні процедури прибирання мають критичне значення для управління цукровим пилом. До них належить регулярне очищення обладнання та виробничих приміщень, що дозволяє зменшити накопичення пилу та запобігти утворенню горючих хмар пилу.

Особливу увагу слід приділяти використанню систем пилососного очищення, зокрема портативних пилососів. Такі системи повинні бути спеціально розраховані для роботи з горючим пилом, щоб не стати потенційним

джерелом займання. Використання пилососів, призначених для роботи з горючим пилом, допомагає мінімізувати ризики займання, забезпечуючи безпеку працівників і виробничого об'єкта загалом.

Потенціал вибухів цукрового пилу є серйозним ризиком, який враховується в національних та міжнародних правилах і стандартах. Різні країни запровадили нормативи для запобігання вибухам та забезпечення безпечного поводження й зберігання цукру та інших горючих пилів.

У Європейському Союзі Європейське агентство з безпеки та гігієни праці розробило рекомендації щодо запобігання вибухам пилу на робочих місцях. Ці рекомендації охоплюють оцінку небезпек, створення планів управління ризиками та навчання працівників. Серед заходів, що пропонуються, – належна вентиляція, регулярне очищення виробничих приміщень та використання вибухобезпечного обладнання для мінімізації ризику.

Крім того, Міжнародна електротехнічна комісія (IEC) встановила стандарти для обладнання, призначеного для роботи в потенційно вибухонебезпечних середовищах, у тому числі таких, що можуть виникати через цукровий пил. Виконання цих стандартів та рекомендацій дозволяє значно знизити ризики вибухів і підвищити безпеку працівників на виробництві.

Дотримання стандартів безпеки щодо горючого пилу є надзвичайно важливим для забезпечення безпеки на об'єктах цукрової промисловості. Основні стандарти NFPA, які застосовуються в галузі, включають NFPA 61, NFPA 652 та NFPA 654.

NFPA 61 містить рекомендації щодо запобігання пожежам та вибухам на підприємствах сільськогосподарської та харчової промисловості, що включає виробництво цукру. NFPA 652 окреслює базові принципи та критерії для розпізнавання і контролю небезпеки пожеж і вибухів, пов'язаних із горючим пилом. NFPA 654 зосереджується на запобіганні пожеж і вибухів під час виробництва, переробки та обробки горючих твердих речовин, таких як цукор.

Дотримання цих стандартів забезпечує безпечні практики роботи, ефективне управління ризиками, пов'язаними з цукровим пилом, а також захист здоров'я працівників і цілісності виробничих об'єктів.

Окрім виконання нормативних вимог, багато компаній цукрової промисловості впроваджують власні системи управління пилом, включаючи використання пиловловлювачів, регулярне прибирання та моніторинг концентрації пилу на робочому місці. Такі заходи допомагають мінімізувати ризики і підтримувати безпечне середовище для персоналу.

3.4. Новітні технології та додаткові заходи

Технологія збору цукрового пилу зазнала значного прогресу завдяки впровадженню інноваційних рішень, що дозволяють ефективно вирішувати проблеми, пов'язані з пилом у цукровій промисловості. Використання передових методів збору цукрового пилу сприяє підвищенню безпеки та ефективності виробництва цукру, знижує ймовірність вибухів пилу та зменшує вплив пилу на навколишнє середовище.

Одним із прикладів таких інновацій є електростатичні фільтри (ЕСФ). ЕСФ – це пристрої для контролю забруднення повітря, які ефективно видаляють дрібні тверді частинки, такі як пил та дим, із промислових потоків повітря. Принцип роботи ЕСФ ґрунтується на електростатичному притяганні: повітряні частинки заряджаються високовольтним електричним полем і притягуються до протилежно заряджених збиральних пластин або електродів.

Компоненти ЕСФ зазвичай включають зарядні електроди, збиральні пластини та джерело живлення. Зарядні електроди надають частинкам електричний заряд, і коли вони рухаються до збиральних пластин, притягуються та осідають на їх поверхні.

Ця технологія довела свою ефективність у захопленні цукрового пилу на різних етапах виробництва, включаючи помел, транспортування та пакування цукру, значно покращуючи якість повітря та знижуючи рівень забруднення на підприємствах.

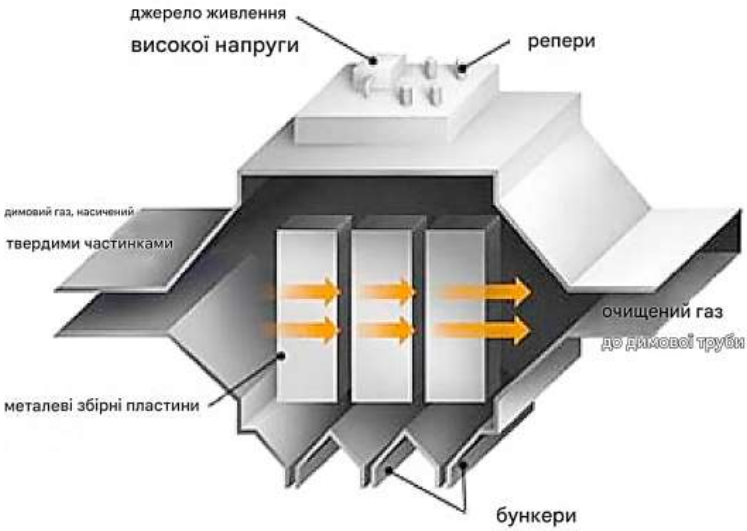


Рис. 10. Схема електростатичного фільтра [12]

Ще одним інноваційним підходом у цукровій промисловості є використання високоефективних повітряних фільтрів (HEPA – High Efficiency Particulate Air). HEPA-фільтри здатні затримувати надзвичайно дрібні частинки з повітря, включно з пилом, пилком, лупою домашніх тварин, димом, а також деякими бактеріями та вірусами, завдяки високій ефективності фільтрації. Ці фільтри зазвичай інтегрують в очищувачі повітря, пилососи та вентиляційні системи, що дозволяє значно покращити якість повітря у виробничих приміщеннях.

Окрім HEPA-фільтрів, розвиток технологій автоматизації сприяв появі самоочисних систем пиловловлення, які можуть автономно виявляти та видаляти пил з обладнання. Це зменшує потребу в ручному прибиранні та знижує ризик накопичення цукрового пилу.

Деякі сучасні системи ще більш досконалі, використовуючи штучний інтелект для оптимізації графіків очищення та збору пилу, підвищуючи ефективність процесу та скорочуючи витрати. Крім того, зростає інтерес до

екологічно чистих рішень для збору цукрового пилу, що дозволяє поєднувати безпеку, ефективність і збереження навколишнього середовища.

Застосування робототехніки та автоматизації стає перспективним напрямком у вдосконаленні управління цукровим пилом. Роботизовані системи можуть автоматично очищати та обслуговувати виробниче обладнання, зменшуючи залежність від ручного прибирання та знижуючи ймовірність накопичення пилу. Крім того, технології автоматизації дозволяють оптимізувати графіки збору та очищення пилу, що підвищує ефективність процесу та скорочує витрати.

Ще одним інноваційним підходом є використання нанотехнологій для управління цукровим пилом. Наночастинки розміром від 1 до 100 нм, виготовлені з природних або синтетичних полімерів, можуть ефективно захоплювати та видаляти частинки цукрового пилу. Це сприяє покращенню якості повітря та зменшенню ризику вибухів пилу.

Крім того, нанотехнології дозволяють створювати більш ресурсощадні та екологічно стійкі системи збору цукрового пилу, що допомагає мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище, пов’язаний із виробництвом цукру, і поєднувати безпеку, ефективність та екологічну відповідальність.

Уряди, галузеві організації та окремі компанії повинні тісно співпрацювати для запобігання нещасним випадкам, пов’язаним із вибухами цукрового пилу, та захисту працівників і навколишнього середовища від потенційної шкоди. Компанії та фабрики повинні забезпечувати регулярне очищення обладнання та поверхонь, застосовувати вибухобезпечне обладнання та впроваджувати ефективні заходи контролю пилу.

Для захисту здоров’я працівників роботодавці повинні забезпечувати засоби індивідуального захисту, такі як респіратори та вогнестійкий одяг, а також належне технічне обслуговування обладнання для зменшення утворення пилу. Регулярний моніторинг якості повітря допомагає виявляти ділянки з високою концентрацією цукрового пилу та оперативно вживати заходів для її зниження.

Крім того, фабрики можуть підвищувати рівень безпеки через освіту та навчальні програми, які інформують працівників про небезпеку вибухів цукрового пилу, методи їх запобігання, правильне використання обладнання та безпечне поводження з цукром. Такий комплексний підхід дозволяє мінімізувати ризики, підвищити обізнаність працівників і забезпечити безпечні умови праці на підприємствах цукрової промисловості.

Вибух цукрового пилу може мати руйнівні наслідки, включаючи травми або смерть працівників, а також значні пошкодження обладнання та споруд. Через це надзвичайно важливо, щоб уряд активно сприяв запобіганню таких вибухів та забезпеченню безпеки на підприємствах цукрової промисловості.

Одним із ключових заходів є впровадження правил та стандартів для цукрово-переробних підприємств. Ці нормативи повинні вимагати від підприємств регулярної перевірки та обслуговування обладнання, щоб запобігти накопиченню цукрового пилу. Крім того, правила повинні передбачати встановлення ефективних вентиляційних систем для очищення повітря від пилу та використання вибухобезпечного електрообладнання, що знижує ризик займання через іскри та інші джерела.

Механізми контролю та забезпечення дотримання правил мають вирішальне значення. Урядові установи повинні створити системи моніторингу для регулярної оцінки підприємств і підтвердження їх відповідності стандартам безпеки. У разі порушень можуть застосовуватися санкції, включаючи штрафи або тимчасове зупинення діяльності, що сприяє формуванню культури безпеки та стимулює підприємства дотримуватися вимог.

Зрештою, державні органи на різних рівнях відіграють ключову роль у реагуванні на вибухи цукрового пилу. Місцеві органи влади повинні забезпечувати негайне реагування на надзвичайні ситуації, координуючи дії з місцевими пожежними службами, службами екстреної медичної допомоги та іншими відповідними установами. Це дозволяє швидко пом’якшувати наслідки вибуху для громади та об’єктів.

На національному та регіональному рівнях уряд зосереджується на більш широких заходах після інциденту. Це включає проведення ретельних розслідувань для встановлення першопричин вибуху та впровадження коригувальних заходів. Крім того, уряд може співпрацювати з галузевими експертами, регуляторними органами та зацікавленими сторонами для оновлення стандартів безпеки, розробки рекомендацій та впровадження найкращих практик у цукровій промисловості.

Такі заходи сприяють підвищенню загальної безпеки на виробництвах та допомагають запобігти майбутнім вибухам цукрового пилу, захищаючи життя працівників і інфраструктуру галузі.

Методи кількісної оцінки ризиків мають великий потенціал для підвищення безпеки та покращення управління ризиками в цукровій промисловості. Майбутні дослідження можуть детальніше вивчати ці підходи, пропонуючи більш глибокий аналіз їхньої застосовності та переваг, що сприятиме розвитку стратегій управління цукровим пилом і загальному вдосконаленню практик безпеки в галузі.

Водночас слід враховувати практичні аспекти впровадження інноваційних технологій. Організації можуть зіткнутися з різними труднощами, від початкових капіталовкладень до необхідності адаптації існуючої інфраструктури та виробничих процесів. Подолання цих викликів є критично важливим для забезпечення безпеки працівників, екологічної стійкості та ефективності виробництва.

Потенційні шляхи вирішення включають поетапне впровадження технологій, співпрацю з постачальниками обладнання та рішень, а також використання державних стимулів для підтримки інновацій. Уважне опрацювання цих труднощів та можливих рішень дозволяє виробникам цукру обрати ефективний і сталий підхід до управління цукровим пилом, підвищуючи безпеку, екологічну відповідальність і стабільність виробництва.

Кількісна оцінка ризиків у цукровій промисловості ґрунтується на системному підході до аналізу небезпеки вибуху пилу та передбачає

використання методів, що дозволяють визначити як імовірність виникнення небезпечних подій, так і масштаб їх можливих наслідків. Для оцінювання імовірності часто застосовується аналіз дерева відмов (FTA), який структурує причини потенційного вибуху у вигляді логічно пов'язаних подій і дає змогу кількісно оцінити внесок кожного чинника. У межах такого підходу розглядаються концентрація пилу в повітрі, наявність джерел займання, ефективність систем запобігання та локалізації. Додатково використовується аналіз дерева подій, що моделює розвиток ситуації після ініціювання інциденту та дозволяє оцінити можливі сценарії його перебігу й відповідні ймовірності наслідків.

Оцінка тяжкості наслідків здійснюється за допомогою аналізу наслідків, який визначає потенційний вплив вибуху пилу на людей, обладнання та довкілля. При цьому враховуються параметри надлишкового тиску вибухової хвилі, теплове випромінювання, а також можливе утворення й поширення небезпечних газів. Кількісні характеристики цих факторів отримують шляхом застосування обчислювальних моделей, зокрема методів обчислювальної гідродинаміки та моделей розсіювання домішок у повітрі.

Об'єднання результатів аналізу ймовірності та наслідків забезпечує комплексне уявлення про рівень загального ризику вибухів пилу в цукровій галузі. Така інформація має ключове значення для управлінських рішень, оскільки дозволяє визначати пріоритетні заходи безпеки, раціонально розподіляти ресурси та впроваджувати ефективні системи контролю, що сприяє захисту працівників, збереженню виробничих активів і запобіганню масштабним аваріям.

Цукровий пил становить суттєву проблему для підприємств цукрової промисловості, оскільки поєднує в собі ризики як для здоров'я працівників, так і для виробничої безпеки. Його наявність у повітрі робочої зони може спричиняти респіраторні захворювання, а накопичення в приміщеннях створює вибухонебезпечне середовище. Саме тому впровадження комплексних та ефективних стратегій управління цукровим пилом є критично важливим для

забезпечення безпечних умов праці, зниження рівня виробничого травматизму та запобігання аварійним ситуаціям.

Серед ключових заходів, що довели свою ефективність у зменшенні ризиків, пов'язаних із цукровим пилом, важливе місце займає регулярне очищення обладнання, технологічних ліній і робочих поверхонь, що запобігає накопиченню пилових відкладень. Не менш значущим є використання належно спроєктованих систем вентиляції та локального пиловловлення, які забезпечують видалення пилу безпосередньо в місцях його утворення. Важливу роль відіграють і організаційні заходи, зокрема впровадження ефективних процедур виробничої санітарії (housekeeping), контроль стану обладнання, а також забезпечення працівників відповідними засобами індивідуального захисту — респіраторами, захисним одягом та іншими засобами.

Водночас успішне управління цукровим пилом неможливе без узгоджених дій усіх зацікавлених сторін галузі. Посилення співпраці між державними регуляторними органами, галузевими асоціаціями та окремими підприємствами сприяє формуванню єдиного підходу до безпеки. Це може реалізовуватися через розробку та впровадження галузевих рекомендацій і найкращих практик, гармонізацію стандартів безпеки, а також створення спільних протоколів дій щодо запобігання утворенню пилу та мінімізації його наслідків. Такий комплексний підхід дозволяє підвищити загальний рівень безпеки в галузі та забезпечити стабільну й безпечну роботу цукрових підприємств.

Технологічний прогрес пропонує низку ефективних інженерних рішень, спрямованих на запобігання вибухам цукрового пилу та мінімізацію їхніх наслідків. Одним із ключових підходів є вибуховідведення, яке передбачає встановлення спеціальних систем, призначених для безпечного скидання надлишкового тиску та полум'я, що утворюються під час вибуху. Це дозволяє зменшити руйнування конструкцій і знизити ризик для персоналу. Важливу роль відіграють і системи вибухогасіння, що здатні виявляти вибух на ранній стадії та пригнічувати його шляхом введення у зону ураження спеціальних речовин —

водяного туману або хімічних інгібіторів, які гасять полум'я та охолоджують гарячі гази.

Не менш значущими є системи ізоляції вибуху, які запобігають поширенню вибухової хвилі між взаємопов'язаними ділянками виробництва або обладнанням. Це може реалізовуватися за допомогою хімічних ізоляційних бар'єрів або механічних пристроїв швидкого відсікання. Ще одним ефективним методом є інертизація — використання інертних газів, таких як азот або вуглекислий газ, для створення середовища зі зниженою концентрацією кисню в зонах наявності цукрового пилу. Зменшення вмісту кисню нижче межі, необхідної для горіння, істотно знижує ймовірність утворення вибухонебезпечних сумішей.

Додатковим елементом сучасних систем безпеки є моніторинг і автоматизований контроль. Впровадження систем безперервного вимірювання концентрації пилу, газів і температури у критичних зонах забезпечує своєчасне виявлення небезпечних відхилень. Це створює можливість для оперативного втручання, запобігання розвитку аварійної ситуації та зменшення масштабів можливих наслідків. У комплексі ці технологічні рішення формують багаторівневу систему захисту від вибухів цукрового пилу на сучасних підприємствах.

Інтеграція зазначених профілактичних заходів і технологічних рішень у виробничу практику дає змогу підприємствам істотно знизити ймовірність вибухів цукрового пилу та підвищити загальний рівень безпеки працівників і виробничих процесів. Системний підхід до управління ризиками, що включає поєднання інженерних засобів захисту, організаційних заходів і сучасних технологій моніторингу, формує багаторівневу систему запобігання аварійним ситуаціям.

Регулярне технічне обслуговування обладнання, своєчасне очищення виробничих зон і періодичний перегляд протоколів безпеки є необхідними умовами підтримання ефективності заходів контролю. Постійне вдосконалення процедур управління дозволяє оперативно враховувати зміни у виробничих

процесах, стані обладнання та нормативних вимогах, забезпечуючи стале зниження небезпек, пов'язаних із горючим пилом, зокрема цукровим.

Крім того, важливо збільшити інвестиції в наукові дослідження та розробки з метою створення нових технологій і обладнання, спрямованих на запобігання накопиченню та поширенню цукрового пилу на виробничих об'єктах. Це може включати розробку вдосконалених систем вентиляції, вибухобезпечного обладнання та інших інноваційних інструментів і технологій, які підвищують рівень безпеки на підприємствах.

Вирішення проблем, пов'язаних із цукровим пилом, потребує узгоджених зусиль усіх зацікавлених сторін у ланцюгу постачання цукру. Спільна робота над створенням нових протоколів безпеки, інвестиції в науково-технічні розробки та пріоритетне ставлення до безпеки працівників дозволяють забезпечити більш безпечне й екологічно стійке майбутнє для світового ланцюга постачання цукру.

Цукровий пил становить серйозну загрозу для здоров'я працівників та безпеки виробництва у цукровій промисловості. Його вплив може проявлятися як у респіраторних проблемах і хронічних захворюваннях, так і у формі потенційних вибухів, що загрожують життю людей, обладнанню та навколишньому середовищу.

Ефективне управління цукровим пилом вимагає комплексного підходу, що включає регулярне очищення приміщень і обладнання, використання пиловловлювальних та вентиляційних систем, засобів індивідуального захисту працівників, а також впровадження сучасних технологій, таких як електростатичні та HEPA-фільтри, автоматизація та робототехніка.

Значну роль відіграє дотримання стандартів безпеки, таких як NFPA, та співпраця між урядовими органами, регуляторами, галузевими асоціаціями й підприємствами. Кількісна оцінка ризиків і впровадження превентивних технологій, включаючи системи вибуховідведення, інертизацію та моніторинг критичних зон, дозволяють мінімізувати небезпеки та підвищити безпеку виробництва.

У довгостроковій перспективі розвиток інноваційних технологій, інвестиції в наукові дослідження та спільна робота всіх учасників ланцюга постачання сприятимуть створенню більш безпечного, ефективного та екологічно стійкого середовища у цукровій промисловості. Загалом, комплексне впровадження таких заходів дозволяє не лише захистити працівників і майно, але й забезпечити стабільність та розвиток галузі в цілому.

Питання для самоконтролю

1. Якими специфічними властивостями характеризується цукровий пил?
2. Що являє собою цукровий пил?
3. Які ризики та небезпеки створює цукровий пил у виробництві цукру?
4. З якими проблемами стикається цукрова промисловість у випадку вторинних вибухів?
5. Який вплив цукровий пил має на здоров'я людини?
6. Як у цукровій промисловості здійснюється контроль та управління цукровим пилом?
7. Яку роль відіграють системи обробки повітря у забезпеченні безпеки виробництва цукру?
8. Хто відповідає за дотримання стандартів безпеки щодо горючого пилу та як це контролюється?
9. Яке значення має технологія збору цукрового пилу на цукрових підприємствах?
10. Якими методами здійснюється збір цукрового пилу під час виробництва?
11. За яким принципом функціонує електростатичний фільтр?
12. Як робототехніка та автоматизація змінюють процес управління цукровим пилом?
13. Як методи кількісної оцінки ризиків допомагають покращити безпеку та управління ризиками у галузі?
14. Які заходи застосовуються у цукровій промисловості для зниження ризиків, пов'язаних із цукровим пилом?

15. Які технологічні рішення пропонує прогрес для запобігання вибухам цукрового пилу?

Рекомендована навчальна література

1. Технологія цукру = Sugar technology : підручник : у 3 т. Т. 1 : Вирощування, зберігання цукрових буряків, видобування сахарози / А. А. Ліпєц, В. М. Логвін, К. Д. Скорик та ін. ; за ред. В. М. Логвіна, А. І. Українця. Київ : Експрес-об'ява, 2015. 288 с.
2. Технологія цукру = Sugar technology : підручник : у 3 т. Т. 2 : Очищення дифузійного соку / А. А. Ліпєц, В. М. Логвін, К. Д. Скорик та ін. ; за ред. В. М. Логвіна, А. І. Українця. Київ : Експрес-об'ява, 2015. 272 с.
3. Технологія цукру = Sugar technology : підручник : у 3 т. Т. 3 : Кристалізація / А. А. Ліпєц, В. М. Логвін, К. Д. Скорик та ін. ; за ред. В. М. Логвіна, А. І. Українця. Київ : Експрес-об'ява, 2015. 208 с.
4. Тютюнник Ю. Г. Цукроварні України. Індустріальна спадщина і ландшафт : монографія / Ю. Г. Тютюнник ; Ін-т еволюційної екології НАН України. Київ : АБС Пресс, 2016. 330 с.
5. Бобрівник Л. Д., Логвін В. М. Хімічні процеси виробництв сахаридів : монографія. Київ : Експрес-Поліграф, 2014. 268 с.
6. Цукрова промисловість: традиції та інновації. Вітчизняний та світовий досвід : наук.-допом. бібліогр. покажч. / упоряд. О. В. Олаборі ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. Київ, 2018. 92 с.
7. Рева Л. П. Фізико-хімічні основи технологічних процесів очищення дифузійного соку у виробництві цукру : монографія. Київ : НУХТ, 2015. 371 с.
8. Процеси і апарати. Механічні процеси і технології надвисокого тиску : підручник / В. С. Бойко, К. О. Самойчук, В. Г. Тарасенко та ін. Мелітополь : Люкс, 2019. 273 с.
9. Технологічні комплекси харчових виробництв : навч. посіб. / В. І. Теличкун, О. М. Гавва, Ю. С. Теличкун та ін. Київ : Сталь, 2017. 456 с.

Розділ 4. ОСОБЛИВІСТЬ ІННОВАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЦУКРУ

4.1. Розгортання найсучаснішого обладнання

Ефективність та надійність обладнання на цукрових заводах є ключовими чинниками, які безпосередньо впливають на продуктивність і прибутковість цукрової промисловості. Сучасні технології та обладнання відіграють важливу роль у оптимізації виробничих процесів, забезпечуючи точний контроль на всіх етапах переробки цукрової тростини або буряків – від отримання соку до його кристалізації.

Технологічний прогрес дозволяє підвищити ефективність процесів, зменшити простої та скоротити час виробничих циклів, що є критично важливим у галузі, де оперативність виробництва визначає комерційний успіх. Використання сучасного обладнання – це не лише модернізація виробничих машин, а й спосіб підтримати конкурентну перевагу на ринку. Мінімізація зупинок, максимізація продуктивності та забезпечення високої якості продукції роблять технологію наріжним каменем ефективного та сталого виробництва цукру.

Обладнання для виробництва цукру охоплює широкий спектр машин та пристроїв, необхідних для переробки цукрової тростини або буряків. До нього входять дробарки та подрібнювачі, апарати для віджимання та освітлення соку, випарники, кристалізатори, центрифуги, сушарки та пакувальні машини. Кожен етап виробництва потребує спеціалізованого обладнання, що забезпечує точність і стабільність процесу.

Таке обладнання використовується як у великомасштабному промисловому виробництві, так і в дрібномасштабному кустарному. Великі підприємства переробляють значні обсяги сировини для отримання рафінованого цукру для комерційного ринку. Кустарне виробництво здійснюється на менших масштабах, часто з використанням традиційних методів та машин.

Прикладами обладнання для цукрових заводів є дробарки тростини, дифузори, випарники, вакуумні апарати, центрифуги, кристалізатори та сушарки для цукру. Кожен із цих елементів забезпечує важливу функцію у виробничому циклі, що гарантує ефективність, якість і безпеку кінцевого продукту.

Проєктування цукрового заводу залежить від ряду змінних, специфічних для конкретного місця розташування, а також від цілей, які ставить перед собою оператор. Ретельний аналіз цих змінних є ключовим для визначення оптимального типу та розмірів обладнання, що буде використовуватися у виробничому процесі. Нижче наведено чотири основні фактори, які слід враховувати при виборі обладнання.

4.2. Фактори, які враховують при прийнятті рішень щодо обладнання

Ключові фактори, які слід брати до уваги при виборі обладнання для цукрового заводу:

1. *Місцеві умови та ресурси* – клімат, доступність води та енергоресурсів, а також умови транспортування сировини.
2. *Мета та масштаб виробництва* – обсяг переробки цукрової тростини або буряків, планована продуктивність та тип кінцевого продукту.
3. *Технологічні вимоги* – необхідні процеси обробки сировини, віджимання соку, кристалізація, сушіння та пакування.
4. *Економічні та операційні аспекти* – витрати на обладнання, енергоефективність, обслуговування, надійність та термін служби.

Якість сировини – показники цукрової тростини або буряків можуть змінюватися протягом сезону, що безпосередньо впливає на виробничий процес. Ці коливання слід враховувати при визначенні оптимального розміру обладнання для заводу. Найважливішими характеристиками сировини, які впливають на вибір обладнання, є брікс (співвідношення розчиненого цукру до води в розчині) та кількість нецукристих розчинних речовин (різниця між бріксом та фактичним вмістом цукру).

Швидкість подрібнення – тривалість сезону переробки та загальна кількість сировини визначають необхідну добову та погодинну продуктивність подрібнювального обладнання на цукровому заводі. Розрахунок швидкості подрібнення на ранньому етапі проєктування є критично важливим для правильного вибору обладнання, оскільки пізніше в процесі розробки внесення змін до конструкції стає складнішим і затратнішим.

Цілі конкретного проєкту – при проєктуванні цукрового заводу слід враховувати численні обмеження, такі як капітальні та операційні витрати, енергоспоживання, рівень викидів та якість сировини. Тому основна мета під час вибору обладнання полягає не в тому, щоб обрати найдешевше чи найпростіше в монтажі обладнання, а в тому, щоб визначити варіант, який найкраще відповідає конкретним цілям та вимогам проєкту.

Можливість майбутнього розширення – плани щодо розширення цукрового заводу слід враховувати ще на ранніх етапах проєктування. Оцінка витрат на збільшення потужності обладнання або виділення додаткового простору дозволяє спроєктувати завод таким чином, щоб він залишався гнучким і легко піддавався масштабним змінам у майбутньому.

Обладнання для виробництва цукру призначене для переробки цукрової тростини або цукрових буряків із метою отримання рафінованого цукру, який надалі використовується у різноманітних харчових продуктах. Рафінований цукор є важливим інгредієнтом багатьох промислово оброблених продуктів, таких як випічка, кондитерські вироби, напої та готові закуски.

Конкретні харчові продукти, що виробляються з використанням обладнання для переробки цукру, включають:

- ✓ цукровий пісок, який застосовується у випічці, кулінарії та як підсолоджувач для гарячих і холодних напоїв;
- ✓ кондитерські вироби, такі як цукерки, жувальні гумки та інші солодощі;
- ✓ сиропи та начинки для млинців, вафель та інших страв для сніданку;
- ✓ безалкогольні та інші напої;

- ✓ перероблені харчові продукти, включно з випічкою, десертами та закусками.

Обладнання для виробництва цукру також застосовується для виготовлення інших цукрових продуктів, таких як патока, коричневий цукор та цукрова пудра.

Принцип роботи обладнання для виробництва цукру залежить від конкретного процесу та типу обладнання, але загалом включає такі ключові етапи:

Екстракція: на цьому етапі з цукрової тростини або буряків витягують сік. Для цього сировину подрібнюють або пресують, щоб максимально виділити розчинний цукор. Ефективність цього процесу визначає вихід соку та майбутню якість цукру.

Очищення: отриманий сік містить різні домішки, включаючи рослинні залишки, пісок та інші тверді частинки. Для їх видалення сік проходить через систему фільтрів та відстійників, іноді з додаванням хімічних речовин, що сприяють освітленню та стабілізації соку.

Випаровування: очищений сік концентрують шляхом нагрівання та випаровування надлишкової води. Процес зазвичай відбувається у серії випарників, що дозволяє поступово підвищувати концентрацію цукру та підготувати сік до кристалізації.

Кристалізація: концентрований сік засівають кристалами цукру, після чого його охолоджують. Це стимулює формування нових кристалів та дозволяє отримати цукор-сирець, який ще містить деякі домішки та невикристалізований цукор.

Рафінування: цукор-сирець піддають додатковій обробці для видалення домішок та отримання білого рафінаду. Для цього використовують різні методи, включаючи карбонізацію (очищення за допомогою вапна та вуглекислого газу), фільтрацію та знебарвлення. Рафінування підвищує якість цукру та робить його придатним для широкого використання в харчовій промисловості.

Упаковка: на завершальному етапі готовий цукор фасують у мішки, пакети або контейнери для зручного транспортування, зберігання та продажу. В умовах сучасних заводів цей процес часто автоматизований для забезпечення точності та гігієнічності.

Обладнання для виробництва цукру призначене для обробки великих обсягів сировини з метою ефективного отримання високоякісного рафінованого цукру. Конкретні типи та конфігурації обладнання залежать від масштабу виробництва та технологічних процесів, що застосовуються на конкретному заводі. Воно використовується для переробки цукрової тростини та буряків у цукор-пісок, рідкий цукор та інші продукти на основі цукру, такі як патока, коричневий цукор та цукрова пудра.

Глобальний ринок обладнання для цукрової промисловості визначається кількома ключовими факторами: зростанням попиту на оброблені харчові продукти, особливо підсолоджені товари, а також збільшенням інтересу до альтернативних підсолоджувачів, таких як стевія чи фруктові екстракти монаха. Це стимулює виробників цукрового обладнання впроваджувати нові технології та автоматизацію для підвищення продуктивності, зменшення втрат сировини та забезпечення високої якості кінцевої продукції.

На ринок обладнання для виробництва цукру також значно впливає зростаючий попит на стійкі та енергоефективні технології, а також на необхідність суворого дотримання стандартів безпеки та регуляторних вимог. Виробники прагнуть зменшити виробничі витрати та підвищити ефективність операцій, що стимулює впровадження сучасного обладнання з розширеними можливостями автоматизації, точного контролю технологічних процесів та моніторингу ключових параметрів виробництва. Такі інновації дозволяють оптимізувати ресурси, підвищувати продуктивність і водночас забезпечувати більш безпечне та екологічно дружнє виробництво цукру.

Географічно прогнозується, що Азіатсько-Тихоокеанський регіон буде лідирувати на ринку обладнання для виробництва цукру в найближчі роки. Це обумовлено високим рівнем споживання цукру та наявністю основних країн-

виробників, таких як Індія, Китай і Таїланд. Водночас ринок демонструє зростання й у інших регіонах, зокрема в Північній Америці та Європі, що зумовлено підвищеним попитом на харчові продукти з додаванням цукру та зростанням тенденції серед споживачів звертати увагу на здоров'я й обирати альтернативні підсолоджувачі. Це створює сприятливі умови для розвитку сучасного, автоматизованого та енергоефективного обладнання для переробки цукру у всьому світі.

4.3. Обладнання для миття цукрових буряків

Миття цукрових буряків часто сприймають як менш важливий етап порівняно з іншими стадіями виробництва бурякового цукру. Проте цей процес має не менше значення, адже його можна розглядати як перший етап очищення, від якого залежить ефективність наступних стадій. Саме тут можуть виникати як позитивні, так і негативні наслідки для подальшої обробки буряку. У французькій системі застосовуються барабанні мийні машини для попереднього, основного та остаточного миття буряків. Такі машини обережно, але ефективно обробляють сировину, забезпечуючи низький вміст залишкових домішок та мінімальні втрати цукру навіть у випадку важких або липких ґрунтів. Промивна вода переважно рухається проти потоку буряків, що дозволяє значно знизити витрату води, а концентрація сухих речовин у вихідній воді виявляється вищою, ніж у більшості інших систем. При правильному проєктуванні та експлуатації така технологія може створити численні позитивні ефекти для всієї роботи заводу.

Барабанні мийні установки для очищення коренеплодів – це спеціалізоване обладнання, широко використовуване на харчових підприємствах для миття та підготовки овочів, таких як картопля, морква, буряк та ріпа. Такі машини забезпечують ефективне видалення ґрунту, сміття та інших забруднень з поверхні коренеплодів, гарантують їх ретельне очищення та підготовку до подальшої обробки, переробки або упаковки. Використання мийок барабанного

типу дозволяє значно підвищити якість продукції, знизити втрати сировини та оптимізувати технологічний процес на підприємстві.

Особливості миючої машини для коренеплодів:

- ✓ призначена для миття різних видів коренеплодів: картоплі, моркви, буряка та інших;
- ✓ миючий барабан виконаний із нержавіючої перфорованої сталі або профільованих планок;
- ✓ оснащена інвертором для регулювання швидкості обертання барабана;
- ✓ додатковий розбризкувач води забезпечує рівномірне миття в барабані;
- ✓ автоматичний контроль рівня води з можливістю регулювання через панель керування;
- ✓ автоматичне скидання відпрацьованої води за таймером;
- ✓ пневматичне управління клапанами скидання води;
- ✓ продуктивність залежно від моделі – від 1 до 20 тон на годину.

Технічні характеристики та переваги:

- ✓ привід на клинових ременях забезпечує тиху та рівномірну роботу;
- ✓ вивантажувальний конвеєр оснащений перфорованими скребками для мінімізації відведення води;
- ✓ циліндричний мотор-редуктор приводу барабана має ресурс роботи, що в 10 разів перевищує ресурс кутових передач;
- ✓ водовідведення здійснюється через дросельні заслінки діаметром 50, 75 або 100 мм – міцні та стійкі до засмічення;
- ✓ центральна система водопостачання забезпечує стабільне миття;
- ✓ антикорозійний захист: конструкція піддається піскоструминній обробці, після чого фарбується двома шарами ґрунтовки, епоксидною фарбою та двома шарами поліуретанової фарби з високим ступенем глянцю (мінімальна сумарна товщина покриття – 160 мкм).

4.4. Машина для миття овочів MB, Pro-Vega

Машина MB, Pro-Vega (Польща) призначена для ефективного миття коренеплодів, таких як картопля, морква, буряк та ріпа, перед подальшою обробкою або пакуванням. Вона забезпечує ретельне видалення бруду, сміття та інших забруднень з поверхні овочів, зберігаючи їх цілісність і якість. Це обладнання є важливою складовою технологічного процесу на харчових підприємствах, оскільки правильне очищення сировини значно впливає на ефективність наступних етапів обробки.

Конструктивно машина оснащена миючим барабаном з нержавіючої перфорованої сталі або профільованих планок, що забезпечує дбайливе та одночасно ефективне миття овочів. Інвертор дозволяє регулювати швидкість обертання барабана, а додаткові розбризкувачі води забезпечують рівномірне змочування та очищення. Рівень води автоматично контролюється через панель керування, а скидання відпрацьованої води здійснюється за допомогою пневматичних клапанів, що спрощує експлуатацію. Продуктивність машини варіюється залежно від моделі і становить від 1 до 20 тон на годину.

Привід на клинових ременях забезпечує тиху і рівномірну роботу обладнання, тоді як циліндричний мотор-редуктор приводного барабана відрізняється значно більшим ресурсом роботи порівняно з кутовими передачами, що підвищує надійність і довговічність машини. Вивантажувальний конвеєр оснащений перфорованими скребками, які мінімізують втрати води під час транспортування овочів після миття.

Система водовідведення побудована на дросельних заслінках діаметром 50, 75 або 100 мм, що не засмічуються і забезпечують стабільне відведення води. Центральна система водопостачання дозволяє рівномірно постачати воду до барабана, що сприяє ефективному миттю та економії ресурсів.

Конструкція машини підлягає антикорозійному захисту: поверхня проходить піскоструминну обробку, потім фарбується двома шарами ґрунтової фарби, епоксидним покриттям і двома шарами поліуретанової фарби з високим

ступенем глянцю, що забезпечує сумарну товщину покриття не менше 160 мкм. Це значно підвищує довговічність обладнання навіть у вологому середовищі.

Автоматизація машини дозволяє регулювати швидкість обертання барабана та рівень води без постійного ручного контролю. Автоматичне скидання води та пневматичне управління клапанами спрощують експлуатацію, зменшують витрати на обслуговування та підвищують загальну ефективність роботи.



Рис. 11. Машина для миття овочів MB, Pro-Vega [13]

Таблиця 5 – Технічні характеристики

Тип	MB-815
Максимальна продуктивність, тон/год	1,0 – 2,0
Барабан, діаметр, м	0,8
Загальна довжина, мм	3250
Встановлена потужність, кВт	1,35

Машина MB, Pro-Vega забезпечує високу продуктивність і гнучкість у використанні на підприємствах різного масштабу, від малих цехів до великих заводів. Її застосування сприяє якісній підготовці сировини для наступних технологічних стадій, зменшенню навантаження на інші системи очищення та підвищенню загальної ефективності заводу. Використання цієї машини дозволяє зберегти суху речовину сировини, мінімізувати втрати цукру і води, що позитивно впливає на економічні показники виробництва.

4.5. Обладнання для одержання бурякової стружки

Для подрібнення коренеплодів цукрових буряків у стружку використовують бурякорізки. Таке подрібнення є необхідним для ефективного вилучення сахарози методом дифузії. Принцип роботи бурякорізок ґрунтується на відносному переміщенні буряків і ножів. Залежно від конструкції ріжучих елементів ці машини поділяються на такі типи:

Відцентрові (з нерухомими ножами) – ножові рами розташовані у пазах вертикального корпусу, а продукт притискається до ножів за допомогою відцентрової сили та лопатей обертового ротора.

Дискові (з рухомими ножами) – ножі закріплені на обертовому диску, а продукт притискається до них спеціальними притисками і власною вагою.

Барабанні (з рухомими ножами) – ножові рами встановлені у пазах горизонтального обертового барабана, а продукт утримується притисками.

Комбіновані – мають дві або більше груп ножів; одна група обертається, а інша зазвичай нерухома та розташована перпендикулярно до рухомих ножів.

Дискові бурякорізки серійно виробляють і широко використовують за кордоном. У цих машинах ножі з рамами розташовані в пазах горизонтального обертового диска, тоді як буряк залишається нерухомим і притискається до ножів власною вагою та спеціальними притискними пристроями.

Дискові бурякорізки споживають значно менше енергії порівняно з відцентровими та барабанними машинами і дозволяють отримувати бурякову стружку високої якості. Водночас при заміні ножів необхідно зупиняти електродвигуни, а при недостатньому митті буряків через часту заміну ножів обслуговування та ремонт стають трудомісткими. Тому висока ефективність роботи дискових бурякорізок забезпечується лише за умови ретельного очищення буряків.

Барабанні бурякорізки мають простішу конструкцію та забезпечують отримання якісної стружки, але витрачають значну кількість електроенергії. Заміну ножів у цих машинах можна проводити лише після зупинки бурякорізки.

Нині у промисловості найпоширенішими є відцентрові бурякорізальні машини. У них ножі закріплені на рамах у пазах вертикального корпусу. Буряк переміщується відносно ножів завдяки ротору та притискається до них відцентровою силою і лопатями спірального пристрою. Відцентрові бурякорізки дозволяють замінювати ножі під час роботи, регулювати продуктивність змінюючи частоту обертання ротора або кількість активних ножів, а також контролювати якість стружки від кожного ножа. Однак вони мають складну конструкцію, дають підвищений вміст браку в стружці і споживають багато електроенергії.



Рис. 12. Відцентрова бурякорізка СВС-16М [14]

Дискова бурякорізка з верхнім приводом складається з таких основних вузлів: рами, кришки, корпусу, диска зі ступицею, ножових рам і ножів, фіксатора, бункера для буряків, приводу та пристрою, який захищає ножі від пошкоджень при потраплянні важких домішок.

Корпус бурякорізки закріплюється на металевому каркасі за допомогою опор і виготовлений як литий чавунний елемент з двома спрямованими лотками. Лотки формуються двома концентричними стінками та двома торцевими стінками — одна вертикальна, інша похила — що створюють простір змінного перерізу (затискач), куди надходить буряк під час різання. На горизонтальній площині затискача розміщені пристрій для захисту ножів від пошкоджень при потраплянні важких домішок, люк для заміни ножових рам, вікно та ребро. До корпусу прикріплюється бункер для буряка, а на внутрішніх приливах встановлений редуктор. На кінці валу редуктора закріплюється диск, у отвори якого вставляються ножові рами з ножами.

Диск бурякорізки обертається за допомогою приводу з регульованою або постійною частотою обертання. Привід з регульованою частотою включає електродвигун, гідромуфту, пристрій для ручного та дистанційного регулювання подачі масла в гідромуфту, електромагнітну муфту та пристрій для обертання диска під час заміни ножових рам. Привід із постійною частотою обертання має аналогічні вузли, але гідромуфта в ньому відсутня.

Пристрій для обертання диска під час заміни ножових рам складається з електродвигуна потужністю 1,5 кВт і черв'ячного редуктора, у якому черв'ячне колесо встановлене на вихідному валу редуктора за допомогою підшипника та муфти. Муфта дозволяє при вимкненому приводі бурякорізки періодично обертати диск із меншою швидкістю, а під час роботи основного приводу пристрій автоматично відключається.

Принцип роботи бурякорізки полягає в наступному. Буряк з автоматичних ваг надходить у бункер, а потім у притискач. Бункер і притискач забезпечують постійну подачу буряків на диск під тиском, достатнім для отримання стружки однакової товщини. Для кращого заповнення корпусу буряком застосовують не більше двох притискних каналів. Висота шару буряків у бункері повинна становити 1,5–2,0 м для отримання якісної стружки; при шарі 0,8 м буряк недостатньо притискається і обертається разом із диском. Щоб запобігти цьому, у найнижчій частині каналу встановлюють контрніжки на відстані не більше 4

мм від верхньої кромки ножів. Оскільки контрніжки затримують сторонні домішки, над ними розміщують люк для зручного доступу.

Буряк, що надходить на диск, ріжеться ножами, встановленими в рами, на бурякову стружку. Середня швидкість різання становить близько 8 м/с, а наявність гідромуфти в приводі дозволяє змінювати її у співвідношенні 1:3. Однак регулювання швидкості має обмеження: при зменшенні швидкості зрізання зменшується вміст мезги у стружці, але її товщина зростає. Бурякорізка зазвичай обладнана продувним пристроєм для ножів, який розташовується за люком для заміни ножів так, щоб напрямок продування збігався з напрямком різання. Пристрій являє собою газову трубку, перфоровану по всій довжині, і продування здійснюється парою або стисненим повітрям під тиском 0,7 МПа.

Таблиця 6 – Технічні характеристики бурякорізок

Показники	**Відцентрова СВС-16М**	**Дискова з верхнім приводом**
Продуктивність, т/добу: жолобчаста стружка; пластинчаста стружка	 2100 1500	 до 2000
Кількість ножових рам	16	26
Швидкість різання, м/с	6,0–9,5	8,0
Частота обертання ротора або диска, $с^{-1}$	7,1–11,4	0,7–1,1
Діаметр корпусу, мм	1600	2200
Потужність електродвигуна, кВт	100	35
Габаритні розміри, мм	5650х2440х3000	3863х2810х1985
Маса, кг	11400	–

В якості прикладу сучасної дискової бурякорізки можна навести машину компанії Maguin SAS – Moret Industries (Франція). Вона ілюструє типову конструкцію такого обладнання: диск із ножами, бункер і притискач для подачі буряків, привід із регулюванням або постійною частотою обертання та продувний пристрій для видалення стружки і сторонніх домішок. Ця бурякорізка забезпечує ефективне різання буряків на стружку високої якості та широко використовується у промисловості за кордоном.



Рис. 13. Барабанна бурякорізка компанії Maguin SAS – Moret Industries [15]

Бурякорізка Maguin SAS – Moret Industries має керування через ПК із сенсорним екраном, легкі та зручні блоки ножів, надзвукове повітряне очищення, автоматичне вимкнення при контакті з твердими предметами та точне регулювання висоти ножів; продуктивність машини складає 500 тон буряків на годину.

4.6. Фугування утфелю. Сепаратори

Утфель – це двофазна в'язка маса, що містить 45–60 % об'єму кристалів цукру та міжкристальний розчин. Процес фугування відбувається під дією відцентрової сили на утфель, завантажений у циліндричний перфорований ротор центрифуги, який обертається з окружною швидкістю 50–90 м/с. Для кращого відділення цукру всередині ротора встановлюють підкладні та фільтрувальні сита. Процес фугування розділяють на три етапи: утворення осаду, ущільнення та механічне сушіння осаду. Перший етап – звичайна фільтрація, при якій тиск створюється гідравлічним напором під дією відцентрових сил. На другому етапі маса перебуває у вигляді двофазної системи, причому спочатку тверді частки мають мінімум контактних точок.

Далі частинки зближуються, об'єм пор маси зменшується, а рідка фаза витискається з цих пор. На міжкристальну рідину діє тиск від твердої фази та відцентрові сили. У процесі стиснення осаду кількість контактних точок між частинками зростає, а тиск на рідину, який створює відцентрове поле, поступово зменшується через зниження гідравлічного напору в міру видалення міжкристального розчину. Коли рівень рідини досягає дренуючого шару, починається третій етап процесу.

На початку третього етапу на поверхні кристалів та в місцях їхнього контакту залишається міжкристальна патока, яка утримується капілярними та молекулярними силами. Цей період характеризується стіканням патоки з незаповнених пор на поверхні кристалів доти, доки сили молекулярного зчеплення залишкової плівки патоки не зрівноважаться з відцентровими силами.

Щоб видалити залишковий розчин з поверхні кристалів, їх промивають водою, а потім сушать парою – цей процес називається пробілкою.

Центрифуги можна класифікувати залежно від основних характеристик. Перш за все, їх поділяють за фактором поділу: нормальні (Фр < 3000) та надцентрифуги (Фр > 3000). Крім того, за способом проведення робочого процесу центрифуги бувають безперервної або періодичної дії.

У цукровій промисловості використовують нормальні та фільтрувальні центрифуги. За способом видалення осаду з ротора їх поділяють на центрифуги з ручним, гравітаційним, ножовим, пульсуючим, шнековим та інерційним вивантаженням. За розташуванням валу, на якому кріпиться ротор, центрифуги бувають з вертикальним або горизонтальним валом. Центрифуги з вертикальним валом, у залежності від розташування опори, можуть бути підвісними (коли опора знаходиться вище центру ваги ротора, а сам ротор закріплений внизу валу) або з ротором на верхньому кінці валу.

Сепаратори класифікують за кількома ознаками: технологічним призначенням, конструкцією барабана, способом та принципом вивантаження осаду (шламу), конструкцією пристрою для вивантаження, способом подачі

вихідної гетерогенної системи та відведення продуктів сепарування, сферою застосування в промисловості та видом приводу сепаратора.

За технологічним призначенням сепаратори поділяють на три основні групи: сепаратори-розділювачі, які використовують для поділу сумішей рідин, несумісних одна з одною, та для концентрування суспензій і емульсій; сепаратори-освітлювачі, призначені для виділення твердих частинок з рідини; і комбіновані сепаратори, що виконують дві або більше операцій переробки рідкої суміші.

Комбіновані сепаратори, які ще називають універсальними, відзначаються багатофункціональністю. До цього класу належать машини, у яких процес поділу поєднується з іншими операціями. Прикладами є сепаратори-екстрактори та сепаратори-реактори.

До класу сепараторів-освітлювачів можна також віднести дві додаткові групи: кларифікатори, призначені для диспергування (гомогенізації) дисперсної фази емульсій та їх очищення від домішок (іноді їх відносять до комбінованих сепараторів), а також сепаратори, що видаляють з рідкої системи мікроорганізми, які накопичуються в шламовому просторі разом з іншими механічними домішками.

Сепаратори за конструкцією барабана поділяють на дві групи: тарілчасті та камерні. Ротор тарілчастих сепараторів оснащений пакетом конічних вставок (тарілок), які розділяють потік рідини на паралельні тонкі шари. У камерних сепараторів ротор містить реберну вставку (для однієї камери) або комплект концентричних циліндричних вставок, що поділяють об’єм на кільцеві камери, через які рідина проходить послідовно.

Тарілчасті сепаратори, незалежно від галузі застосування та призначення, поділяють на два основні типи. Перший тип має тарілки з отворами, через які рідина подається в міжтарілкові простори; такі машини часто називають сепараторами з центральною подачею рідини. До цієї групи також належать сепаратори, у яких рідина надходить на вершину тарілок через прорізи в тарілкотримачах. Другий тип відрізняється тим, що рідина подається з периферії

у міжтарілкові простори й рухається до центру барабана; у таких сепараторах тарілки зазвичай не мають отворів.

За способом подачі вихідної гетерогенної системи та відведення продуктів сепарування сепаратори поділяють на три типи: відкриті, напівзакриті та герметичні. У відкритих сепараторах рідка суміш подається в ротор і рідкі фракції відводяться відкритим потоком, тобто процес сепарування не ізольований від доступу повітря.

У напівзакритих сепараторах рідина надходить у ротор відкритим або закритим потоком, а відведення однієї або обох рідких фракцій здійснюється під тиском через закриті трубопроводи. При цьому процес сепарування не повністю ізольований від впливу повітря.

Ротори напівзакритих сепараторів відрізняються від відкритих наявністю пристроїв для виведення продуктів сепарування під тиском. У герметичних сепараторах подача вихідної рідини та відведення рідких фракцій здійснюються під тиском через закриті трубопроводи, герметично з'єднані з випускними патрубками, і процес сепарування повністю ізольований від повітря. Ротори герметичних сепараторів відрізняються від відкритих і напівзакритих конструкцією пристроїв для подачі та відведення рідких продуктів.

За типом приводу сепаратори поділяють на три групи: з ручним приводом, з комбінованим приводом та з електромеханічним приводом.

Фільтри у промисловості класифікують за кількома основними ознаками залежно від принципу їхньої роботи та конструктивних особливостей. За видом тиску, що використовується для переміщення середовища через фільтруючий елемент, розрізняють вакуум-фільтри, де створюється розрідження, та фільтр-преси, де тиск створюється механічно. За типом фільтруючих перегородок виділяють рамні, листові, дискові, патронні та трубчасті фільтри, що різняться формою та способом утримання фільтруючого матеріалу. За способом очищення фільтри можуть бути з ручним очищенням, механізованим або регенеративним, коли відновлення працездатності фільтруючого елемента відбувається автоматично. Нарешті, за способом дії вони поділяються на фільтри періодичної

дії, де процес фільтрування та очищення відбувається циклічно, та безперервної дії, що дозволяє забезпечувати постійний потік фільтрату.



Рис. 14. Схема барабанів тарілчастих сепараторів [16]

Відстійники, центрифуги та сепаратори. Відстійники призначені для розділення рідких неоднорідних сумішей за різницею густини між дисперсною та дисперсійною фазами. У цукровій промисловості для розділення соку першої сатурації застосовують відстійники таких типів, як Дорра, Пассоса, Чугунова, а також системи Діпроцукру та інші.

У відстійнику отримують 75–80 % освітленого соку та 20–25 % згущеного осаду від маси нефільтрованого соку першої сатурації. Освітлений сік направляють на контрольну фільтрацію, а згущену суспензію — на вакуум-фільтри. Відстійники виготовляють діаметром 4000–5500 мм і висотою 4000–6500 мм. Їхня продуктивність при переробці буряків становить 1000–2500 т/добу, а загальна місткість — 95–150 м³. Конструкція відстійників у принципі однакова, відмінності стосуються лише пристроїв для подачі

нефільтрованого соку першої сатурації, відведення освітленого соку та видалення згущеної суспензії.

Найбільш ефективним способом видалення згущеної суспензії є її відведення з кожної секції після досягнення певної густини. Такий підхід запобігає зайвому перемішуванню суспензії при переході з однієї секції відстійника в іншу разом із соком першої сатурації та покращує процес відстоювання.

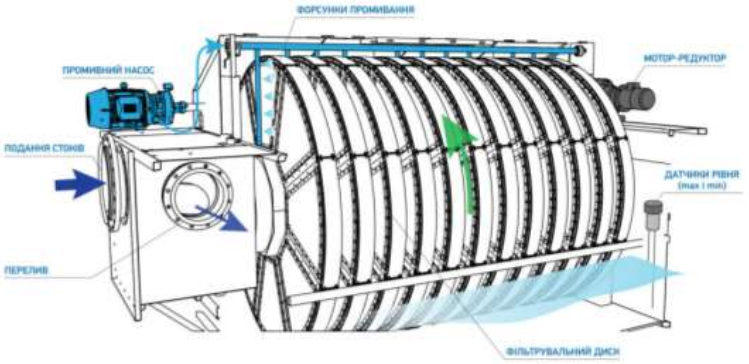
У різних конструкціях відстійників освітлений сік із секцій відводиться або через одне периферійне кільце, або через чотири концентричні кільця, розташовані на рівній відстані одне від одного. Під час безперервного відстоювання і стабільної продуктивності кожної секції формується постійна поверхня розділу між освітленою рідиною та згущеною суспензією. Ця поверхня встановлюється на висоті секції, де швидкість потоку дозволяє ефективне осадження твердих частинок. Освітлена рідина, що перебуває над цією поверхнею, безперервно відводиться, а під нею подається сік першої сатурації.

Згущена суспензія відводиться також з-під цієї поверхні. Основним фактором, що визначає висоту та об’єм відстійника, є швидкість потоків вихідної суспензії, освітленої рідини та згущеної суспензії. Осадження твердих частинок можливе незалежно від режиму потоків лише тоді, коли вертикальна складова швидкості вихорів не перевищує швидкість осадження частинок у спокійному середовищі.

Розосереджене відведення рідини можна здійснювати, наприклад, за допомогою кільцевих труб. При розташуванні отворів для відведення освітленого соку слід забезпечити рівномірний переріз, щоб швидкість потоку соку у всіх отворах була однакова і не перевищувала допустиму. Рівномірне подавання неосвітленої суспензії від трубовалу до поверхні розділу найзручніше організувати за допомогою конструкції зі скребками для видалення згущеної суспензії, при цьому швидкість введення суспензії має бути меншою за швидкість осадження твердих частинок.

4.7. Фільтраційне обладнання

Під час фільтрації соку першої сатурації на цукрових заводах застосовуються методичні промивання осаду та його гідравлічне видалення з поверхні фільтрувальних елементів. Це дозволяє підтримувати високу ефективність фільтрації та запобігати засміченню фільтрувальної поверхні, що могло б знижувати продуктивність обладнання та погіршувати якість освітленого соку (рис. 15).



а)



б)

Рис.15. Дисковий фільтр серії ДФ-100 (Україна):
а – схема фільтру; б – загальний вигляд [17]

На деяких підприємствах для фільтрації соку другої сатурації використовуються дискові фільтри. У цьому випадку основні принципи обслуговування фільтрів залишаються такими ж, як і для соку першої сатурації, однак слід враховувати особливості їх конструкції та монтажу. Робота дискових фільтрів здійснюється без традиційного промивання осаду. Замість цього осад після гідравлічного змивання спеціальними сопловими пристроями, за допомогою фільтрованого соку першої або другої сатурації, спрямовується на переддефекацію через насос рециркуляційного соку. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати сировину та мінімізувати втрати продукту під час фільтрації.

При встановленні дискових фільтрів необхідно передбачити відповідні комунікації для подачі соку та відведення змитого осаду, забезпечуючи безперебійну роботу системи. Водночас підведення аміачної води та стисненого повітря до цих фільтрів не здійснюється, оскільки їхня робота не потребує додаткових промивальних або пневматичних систем. Завдяки такій організації процесу забезпечується стабільна продуктивність фільтрів, зменшується ризик забруднення обладнання та покращується якість освітленого соку, що надходить на наступні стадії переробки.

4.8. Нетканинний роторний вакуумний фільтр

Нетканинний роторний вакуумний фільтр відзначається рядом переваг, серед яких відсутність скидання стічних вод, низька конверсія сухого фільтрувального бруду, безперервна робота, велика вантажопідйомність та висока виробнича ефективність. Барабан та бак для збору бруду виготовлені з корозійностійкої нержавіючої сталі, а сам фільтр — із високоякісної нержавіючої сталі, що забезпечує довговічність та надійність обладнання.

Система трансмісії фільтра базується на циклоїдному голчастому редукторі з прямим приводом, який приводиться в рух дворядним роликовим ланцюгом. Така конструкція забезпечує стабільну та надійну роботу, а порівняно

з традиційною черв'ячною передачею вона має вищу ефективність, нижче енергоспоживання та зменшене навантаження на корпус барабана.



Рис.16. Нетканинний роторний вакуумний фільтр [18]

Таблиця 7 – Технічна характеристика

Елементи	Г40	Г55	Г75	Г85
Площа всмоктування, $м^2$	38	55	75	85
Діаметр барабана, мм	3000	3000	3000	3000
Довжина барабана, мм	4000	6000	7500	9000
Швидкість барабана, об/хв	0,5	0,5	0,5	0,5
Переробна потужність, $м^3$/год	19,5	26	38	43
Перемішування, разів/хв	20	20	20	20
Вага машини, кг	11300	12500	13000	14000
Загальні розміри, мм	6350×3360×3660	9000×3900×4100	10800×3900×4100	14800×3900×4100

Особливістю машини є універсальна система регулювання скидання розчину, що дозволяє гнучко адаптувати роботу фільтра під різні умови виробництва. Завдяки цим характеристикам, нетканинний роторний вакуумний фільтр широко застосовується у цукровій, фармацевтичній, лакофарбовій, паперовій, хімічній та інших галузях промисловості.

4.9. Випарні станції

Випарники з падаючою плівкою фірм Cail & Fletcher здобули широку популярність і вважаються одними з найефективніших на ринку. Це пояснюється їхньою високою продуктивністю, рівномірним тепломасообміном, здатністю обробляти рідини з високою в'язкістю та низьким ризиком перегріву продукту. Завдяки цим властивостям такі випарники широко застосовуються в цукровій, харчовій та хімічній промисловості, забезпечуючи стабільну та економічно ефективну роботу.



Рис.17. Випарна станція за Cail & Fletcher [19]

Випарник з падаючою плівкою Cail & Fletcher відіграє важливу роль у зменшенні загального енергоспоживання на цукровому заводі.

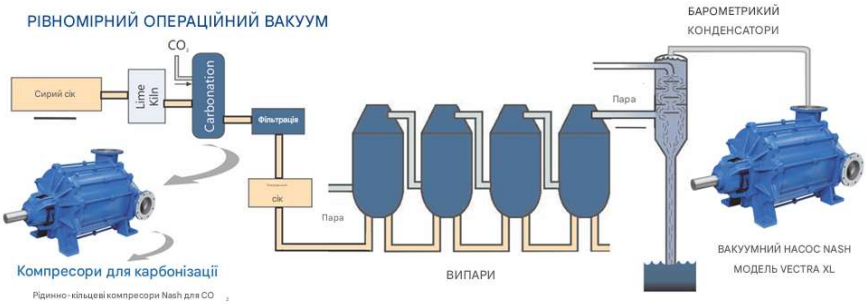


Рис.18. Технологічна схема станції випарювання [20]

Випарник з падаючою плівкою Cail & Fletcher є ключовим елементом у зниженні загального споживання енергії на цукровому заводі. Його конструкція забезпечує рівномірне формування тонкої плівки соку на внутрішніх поверхнях випарної колони, що значно підвищує ефективність тепломасообміну. Завдяки швидкому і рівномірному випаровуванню рідини з мінімальним перегрівом продукту, витрати пари знижуються, а енергоспоживання заводу в цілому стає більш економним. Такий випарник дозволяє одночасно підтримувати високу продуктивність і якість продукту, що робить його важливим інструментом енергозбереження в цукровій промисловості.

У станції випаровування, яка концентрує сік зі станції очищення, застосовують до шести послідовних етапів випарювання.

Завдяки оптимізованій системі розподілу, випарник ефективно подає концентрований сік або сироп на станцію кристалізації. Це забезпечує високий коефіцієнт теплообміну, низьку різницю температур (ΔT°) та мінімальне забруднення внутрішніх поверхонь труб. Крім того, обладнання може виконувати функцію трансформатора водяної пари, що підвищує загальну енергоефективність процесу.



Рис.19. Випарні апарати [21]

Крім того, система розподілу випарника з падаючою плівкою обладнана підйомною конструкцією, яка забезпечує зручний, швидкий і безпечний доступ до верхньої трубної пластини для проведення обслуговування та очищення.

4.10. Стандартна галузева технологія кристалізації цукру

Відомі технології кристалізації фірми Fives відрізняються повною автоматизацією, високою гнучкістю та енергоефективністю. Безперервний вакуумний апарат Cail & Fletcher у поєднанні з барометричним конденсатором встановлює галузевий стандарт для процесів кристалізації та випаровування соку з тростини та цукрових буряків.



Рис. 20. Промисловий кристалізатор цукру [22]

Кристалізатор з охолодженням Cail & Fletcher забезпечує максимальне зниження вмісту цукру в мелясі завдяки точному контролю параметрів процесу. Регулювання в’язкості утфелю та температури охолодження дозволяє досягти оптимальної кристалізації, що зменшує втрати цукру в побічному продукті та підвищує вихід товарного цукру. Такий підхід також сприяє рівномірному росту кристалів, стабільності процесу та підвищенню енергоефективності виробництва, роблячи кристалізатор важливим елементом сучасної цукрової технології.

Пара, що утворюється у вакуумному піддоні або випарнику, повинна конденсуватися для створення вакууму, в якому можливий ріст кристалів. Барометричний конденсатор Cail & Fletcher від Fives забезпечує глибокий та стабільний вакуум для процесів кристалізації, випаровування та фільтрації цукру. Він відзначається особливо низьким споживанням води, нечутливістю до її якості та мінімальними вимогами до обслуговування. Конденсатор доступний у трьох різних конструкціях — Cail, Rain Tray та Petal — що дозволяє обирати оптимальний варіант залежно від умов монтажу та технологічних потреб заводу.



Рис. 21. Барометричний конденсатор Cail & Fletcher [23]

Барометричний конденсатор Cail & Fletcher зріджує пару, що надходить із вакуумного піддона, шляхом прямого контакту з холодною водою у протитечії. Охолоджувальна вода видаляється знизу через барометричний отвір або дренаж, тоді як неконденсовані гази збираються у верхній частині конденсатора перед тим, як потрапити у вакуумний насос.

4.11. Вертикальні кристалізатори з охолодженням: мінімізація чистоти меляси, підвищення продуктивності та доходу

Вертикальний кристалізатор з охолодженням Cail & Fletcher забезпечує максимальне зниження вмісту цукру в мелясі — щонайменше на п’ять пунктів, залежно від складу нецукрів — завдяки точному контролю в’язкості утфелю та профілю температури охолодження. Утфель охолоджується рівномірно зі швидкістю близько 1 °C на годину до 40 °C, без каскадного охолодження, що відрізняє його від горизонтальних кристалізаторів. Охолоджувальні трубки виконані на 100 % безшовними та надійно зафіксовані, а всі точки зварювання розташовані зовні кристалізатора, що запобігає можливому витоку утфелю. У випадку бурякового виробництва частина вертикального кристалізатора може бути використана для повторного нагрівання утфелю, підвищуючи гнучкість та ефективність процесу.



Рис. 22. Вертикальні крсталізатори Cail & Fletcher [24]

Перегрівач утфелю Fives для оптимізованого центрифугування Cail & Fletcher, з великою нагрівальною поверхнею до 1400 м², є простим і ефективним пристроєм для кондиціонування низькосортного утфелю перед центрифугуванням. Він знижує в'язкість утфелю, що забезпечує оптимальне центрифугування та високу пропускну здатність. Міцна та компактна конструкція обладнання дозволяє підтримувати високий потік утфелю при мінімальних витратах на обслуговування.



Рис.23. Перегрівач утфелю Fives для оптимізованого центрифугування Cail & Fletcher [24]

Вертикальний кристалізатор і підігрівач Cail & Fletcher демонструють високі технологічні показники завдяки максимальному вилученню меляси, забезпечуючи економічно ефективне рішення для підвищення продуктивності. Основні переваги:

- ✓ Низьке споживання електроенергії: від 0,03 до 0,05 кВт·год на тону тростини.
- ✓ Високий коефіцієнт теплопередачі і мінімальна різниця температур між утфелем та водою, що підвищує ефективність охолодження та кристалізації.
- ✓ Високе співвідношення висоти до діаметра, яке посилює ефект поршневого потоку та забезпечує рівномірний рух утфелю.

- ✓ Перегрівач з великою нагрівальною поверхнею (до 1400 м²) та оптимізованим профілем потоку, що виключає мертві зони і мінімізує втрати цукру.

Таблиця 8 – Розміри та габарити вертикального кристалізатора

Об'єм, $м^3$	Поверхня, м2	Діаметр, м
150 – 700	165 – 1330	4,50 – 5,75

Таблиця 9 – Розміри та габарити перегрівача

Поверхня, $м^2$	Довжина, м	Ширина, м	Висота, м
140 – 1400	2,80 – 6,30	0,88 – 3,80	2,80 – 4,70

Ця вертикальна система потребує мінімального обслуговування та забезпечує низьке споживання енергії — від 0,03 до 0,05 кВт·год на метричну тону тростини. Така ефективність досягається завдяки оптимізованій конструкції, яка забезпечує рівномірний рух утфелю та високу продуктивність теплообміну без необхідності додаткових енергозатрат. Мінімальне обслуговування скорочує час простою обладнання та знижує витрати на персонал, а низьке енергоспоживання дозволяє економити ресурси заводу, підвищуючи загальну економічну ефективність виробництва цукру.

4.12. Короткий огляд цукрових центрифуг

Цукрові центрифуги є основним обладнанням у виробництві цукру, забезпечуючи відділення кристалів цукру від патоки та перетворення цукру-сирцю на високоякісний рафінований продукт. Принцип їх роботи базується на відцентровій силі, що створюється високошвидкісним обертанням, яке забезпечує ефективне розділення. Існують два основні типи центрифуг: періодичної та безперервної дії, кожен з яких має свої переваги та області застосування залежно від вимог процесу.

Центрифуги відіграють ключову роль після кристалізації, забезпечуючи видалення домішок і надлишкової вологи. Це дозволяє отримати цукор із

бажаною чистотою, кольором і гранулюванням, відповідний галузевим стандартам та очікуванням споживачів.

Центрифуга TITAN Batch Centrifugal розроблена як проста в обслуговуванні, ефективна та економічно вигідна машина, що забезпечує високу віддачу від інвестицій у цукровій промисловості. Обслуговування цієї відцентрової машини періодичної дії спрощене завдяки мінімальній кількості рухомих частин та використанню високоміцних сплавів і неметалевих харчових компонентів, оптимізованих для обробки тростинного цукру. Інноваційна технологія частотно-регульованого приводу та система керування PLC забезпечують ефективну роботу з низьким енергоспоживанням. CENTRIFUGA TITAN Batch доступна в ємностях від 1400 до 2400 кг.



Рис. 24. Центрифуга TITAN Batch [25]

У США виготовляють як періодичні, так і безперервні центрифуги для обробки всіх видів цукру та цукрової тростини. Центрифуги компанії Western States застосовуються не лише в буряковій та цукровій промисловості, а й у інших галузях, що не пов'язані з виробництвом сахарози, наприклад при виготовленні підсолоджувачів на основі декстрози та фруктози.

Періодичні центрифуги — це тип обладнання, який застосовується у різних промислових галузях, зокрема у цукровій, для розділення твердих частинок і рідин або сортування частинок за щільністю. У цукровому виробництві такі центрифуги призначені для відокремлення кристалів цукру від маточного розчину (меляси) після процесу кристалізації.

Центрифуги безперервної дії — це тип обладнання, що застосовується в різних галузях промисловості, зокрема у цукровій, для розділення твердих частинок і рідин або сортування частинок за щільністю. У сучасному виробництві цукру вони є ключовими завдяки високій ефективності, продуктивності та здатності працювати без зупинок, що особливо важливо для великомасштабної промислової переробки. Завдяки автоматизації та стабільній роботі такі центрифуги часто стають оптимальним вибором для цукрових і переробних підприємств по всьому світу.

Центрифуга TITAN оснащена повністю перфорованим кошиком із бічною стінкою з дуплексної нержавіючої сталі 2205, нижньою пластиною зі сталі 316 та кришкою, що забезпечує швидке та ефективне очищення, тривалий термін служби та високий рівень безпеки. Кошик динамічно збалансований та перевірений рентгенівським контролем для гарантії надійності роботи. Центрифуга має закриту систему подачі з клапаном проти крапель, що запобігає забрудненню продукту, та електронне керування клапаном з послідовним закриттям для забезпечення максимального завантаження в кожному циклі. Нижній клапан кошика абсолютно безперешкодно відкривається вниз, а великий розвантажувальний плуг із пружинним наконечником забезпечує ефективне розвантаження та захист грохота. Обладнання комплектується компактним частотним перетворювачем без потреби в енкодері, а двигун узгоджений із

приводом для максимальної сумісності. Повнокольоровий сенсорний екран із графічним інтерфейсом оператора забезпечує зручну діагностику технічного обслуговування та нагадування про нього. Центрифуга оснащена підшипниками з мастилом, дисковим гальмом для екстреного зупинення та системою моніторингу гірації і вібрацій. Кожен блок повністю тестується та перевіряється перед відправкою. Додатково передбачене відділення сиропу для класифікації меляси. Пристрої TITAN забезпечують енергозбереження та мінімальне споживання води під час миття, що позитивно впливає на навколишнє середовище, а також мають найнижчі витрати енергії на тону утфелю та найбільшу відкриту площу кошика на ринку для неперевершеного очищення. ПЛК-керування забезпечує точне управління центрифужним циклом та стабільну ефективну роботу.

6.13. Обладнання для центрифугування високоякісного утфелю

Центрифуги періодичної дії Cail & Fletcher ZUKA® та D412 вважаються загальновизнаними світовими еталонами в галузі центрифугування утфелю високої якості. Це сучасне обладнання забезпечує ефективне відцентрове розділення маточного розчину та кристалів цукру, що є ключовим етапом технологічного процесу на цукрових заводах. Зазначені центрифуги широко застосовуються як на підприємствах з переробки цукрової тростини та цукрових буряків, так і на рафінадних заводах, де висуваються підвищені вимоги до чистоти та якості кінцевого продукту.

Центрифуги безперервної дії Cail & Fletcher FC1300/1550 призначені для стабільного та безперебійного відокремлення кристалів цукру від утфелю в умовах інтенсивного виробництва. Їх конструкція та принцип роботи дозволяють досягати мінімальних втрат сахарози, що сприяє підвищенню виходу готового цукру та загальної ефективності виробничого процесу.



Рис. 25. Промислова зала центрифуг безперервної дії
Cail & Fletcher FC1300/1550 [26]

Окрему увагу заслуговують центрифуги безперервної дії Cail & Fletcher e-Crystal™, які поєднують у собі інноваційні технологічні рішення та високий рівень автоматизації. Окрім забезпечення найвищої якості цукрових кристалів з однорідними фізико-хімічними характеристиками, ці центрифуги здатні працювати в автономному режимі, що зменшує залежність від людського фактору, оптимізує енергоспоживання та підвищує надійність і стабільність виробництва.

4.14. Інноваційне обладнання для сушіння кристалів цукру

Для сушіння кристалів цукру у промислових умовах застосовують барабанні сушарки з обертовим робочим органом, у яких реалізується принцип протитечії. Найпоширенішим обладнанням на цьому етапі технологічного процесу є саме обертовий барабан, що забезпечує рівномірний контакт кристалів із сушильним агентом і стабільність тепломасообміну.

Протитечійна схема сушіння вважається найбільш ефективною, оскільки дозволяє точно контролювати швидкість випаровування вологи та запобігає її локальному накопиченню на поверхні кристалів. Завдяки цьому знижується

ризик злипання та агломерації цукрових зерен, а також зберігається їх правильна форма і сипучість.

Обертовий барабан створює оптимальні умови для реалізації цього процесу: у міру повільного обертання кристали цукру поступово перемішуються та перекочуються, забезпечуючи рівномірне висихання. Одночасно залишковий сироп, що утримується на поверхні кристалів, зазнає додаткової кристалізації, що позитивно впливає на якість готового продукту. Сушіння є відносно тривалим етапом, оскільки надмірно інтенсивне видалення вологи може призвести до дефектів структури кристалів.

Варто зазначити, що завершальна стадія процесу кристалізації відбувається не безпосередньо в сушарці, а в охолоджувачі, де за рахунок зниження температури остаточно стабілізується структура кристалів та формується їх кінцева фізико-хімічна характеристика.



Рис. 26. Ротаційна трубчаста сушарка Ingetecsa, Іспанія [27]

Ротаційні барабанні сушарки можуть функціонувати як у режимі прямотечійного нагрівання, так і в протитечійному режимі. За прямотечійної схеми продукт і потік гарячого газу рухаються паралельно в одному напрямку

вздовж барабана, що забезпечує інтенсивний початковий тепловий вплив і скорочення часу сушіння. У протитечійному режимі, навпаки, сушильний агент рухається у напрямку, протилежному руху матеріалу, завдяки чому досягається більш рівномірний тепломасообмін і кращий контроль температури продукту на виході.

Вибір конкретної конфігурації сушарки визначається вимогами технологічного процесу, фізико-хімічними властивостями матеріалу та допустимим рівнем його нагрівання. Ротаційні барабанні сушарки характеризуються високою універсальністю й можуть застосовуватися для оброблення широкого спектра матеріалів, зокрема порошкоподібних продуктів, фільтраційних осадів, волокнистих матеріалів, кускових фракцій, а також матеріалів із підвищеною липкістю.

Як теплоносій у таких сушарках використовують гаряче повітря, гази згоряння або вторинні теплові потоки, наприклад вихлопні гази інших технологічних процесів, що дозволяє підвищити загальну енергоефективність виробництва. Джерелом тепла може слугувати практично будь-який вид палива — як у монопаливному, так і в двопаливному виконанні, що забезпечує гнучкість експлуатації та адаптацію обладнання до конкретних умов підприємства.

Вологий матеріал надходить у сушильний барабан або за допомогою спеціального подавального пристрою, або самопливом під дією сили тяжіння через подавальну трубу. Усередині повільно обертового барабана напрямні пластини та внутрішні перегородки забезпечують рівномірний розподіл продукту по всьому об’єму та сприяють стабільному руху матеріалу вздовж апарата.

Під час обертання барабана спеціально сконструйовані підйомні лопаті захоплюють продукт, піднімають його вгору і потім скидають вниз, утворюючи своєрідну «завісу» з частинок. У такому стані матеріал інтенсивно контактує з потоком гарячого повітря, що омиває окремі частинки та забезпечує ефективний тепло- і масообмін.

Середній час перебування продукту в барабанній сушарці є відносно тривалим порівняно з багатьма іншими способами сушіння і для більшості практичних застосувань становить приблизно від 30 до 60 хвилин. Завдяки такому режиму ротаційні барабанні сушарки особливо добре підходять для матеріалів із нерівномірною формою та великими частинками, а також для продуктів із широким гранулометричним складом.

Водночас для дрібнодисперсних матеріалів ця технологія є менш ефективною, оскільки малі частинки легко захоплюються потоком гарячого газу та можуть виноситися з апарата разом із відпрацьованим повітрям, що ускладнює процес і потребує додаткових систем уловлювання.

Ротаційна барабанна сушарка вирізняється простотою експлуатації, високою універсальністю та здатністю обробляти великі обсяги сировини, навіть при значних коливаннях її кількості. Її конструкція відзначається простотою та міцністю, що забезпечує надійну роботу в промислових умовах. Саме завдяки цим перевагам ротаційні барабанні сушарки отримали широке поширення у цукровій промисловості по всьому світу.

Проте з підвищенням вимог до якості кінцевого кристалу цукру стало очевидним, що традиційне сушіння та охолодження в обертових барабанах має певні обмеження. Зокрема, у процесі обертання кристали піддаються механічному впливу, що призводить до їх часткового руйнування та зниження якості зовнішнього вигляду.

Дослідження показали, що використання охолоджувачів з псевдозрідженим шаром значно знижує механічне пошкодження кристалів. Така технологія дозволяє отримувати більш блискучі та однорідні кристали, одночасно ефективно відокремлюючи дрібні частинки від основного потоку продукту. Це спонукало до пошуку комбінованих рішень, здатних поєднати високу продуктивність і дбайливе ставлення до продукту.

У тісній співпраці з виробниками цукру компанія Ingetecsa продемонструвала, що оптимальним підходом є інтеграція традиційного ротаційного барабана з охолоджувачем на основі статичного псевдозрідженого

шару. Таке поєднання дозволяє отримувати кристалічний цукор, який відповідає найсучаснішим і найсуворішим стандартам щодо: кристалічного блиску та однорідності поверхні; максимальної збереженості частинок; ефективного відділення дрібних фракцій.



Рис. 27. Поєднання роторної барабанної сушарки з охолоджувачем псевдозрідженого шару Ingetecsa, Іспанія [27]

Поєднання ротаційної барабанної сушарки та охолоджувача з псевдозрідженим шаром об'єднує переваги обох технологій: високу енергоефективність, надійність роботи, гнучкість у виборі типів сировини та дбайливе полірування кристалів, забезпечуючи стабільно високий стандарт якості кінцевого продукту.

Питання для самоконтролю

1. Які основні фактори безпосередньо впливають на продуктивність і економічну ефективність цукрового виробництва?
2. Як якість сировини позначається на технологічному процесі та кінцевих показниках виробництва цукру?

3. Чому важливо визначати швидкість подрібнення сировини на початковому етапі обробки?

4. Як принцип роботи різного обладнання впливає на ефективність цукрового виробництва?

5. Які основні технологічні принципи закладені в апаратах для миття цукрових буряків?

6. У чому полягають ключові відмінності між різними типами мийних апаратів для цукрової сировини?

7. З якою метою проводиться подрібнення цукрового буряку перед подальшою обробкою?

8. Чим відрізняються відцентрові бурякорізки від барабанних і як це впливає на процес обробки?

9. Які характерні особливості мають процеси фугування утфелю в цукровому виробництві?

10. Що означає термін «пробілка» цукрової маси і яка її технологічна роль?

11. За якими ознаками класифікують сепаратори в цукровій промисловості?

12. Як поділяють сепаратори залежно від типу приводу та механізму роботи?

13. На якому принципі функціонує нетканинний роторний вакуумний фільтр?

14. З якою метою застосовують випарні станції у виробництві цукру?

15. У чому полягає сутність і технологічний зміст процесу кристалізації цукру?

16. За яким принципом побудовані апарати для кристалізації та як це впливає на якість кристалів?

17. Яку роль у процесі випарювання відіграє барометричний конденсатор?

18. Які види кристалізаторів у сучасному цукровому виробництві вважаються інноваційними?

19. З якою метою використовують центрифуги та як вони впливають на вихід і якість цукру?

20. Які переваги та особливості закладені в інноваційних сушарках для цукру, що забезпечують підвищення якості продукту?

Рекомендована навчальна література

1. Технологія цукру = Sugar technology : підручник : у 3 т. Т. 1 : Вирощування, зберігання цукрових буряків, видобування сахарози / А. А. Ліпєц, В. М. Логвін, К. Д. Скорик та ін. ; за ред. В. М. Логвіна, А. І. Українця. Київ : Експрес-об'ява, 2015. 288 с.
2. Технологія цукру = Sugar technology : підручник : у 3 т. Т. 2 : Очищення дифузійного соку / А. А. Ліпєц, В. М. Логвін, К. Д. Скорик та ін. ; за ред. В. М. Логвіна, А. І. Українця. Київ : Експрес-об'ява, 2015. 272 с.
3. Технологія цукру = Sugar technology : підручник : у 3 т. Т. 3 : Кристалізація / А. А. Ліпєц, В. М. Логвін, К. Д. Скорик та ін. ; за ред. В. М. Логвіна, А. І. Українця. Київ : Експрес-об'ява, 2015. 208 с.
4. Тютюнник Ю. Г. Цукроварні України. Індустріальна спадщина і ландшафт : монографія / Ю. Г. Тютюнник ; Ін-т еволюційної екології НАН України. Київ : АБС Пресс, 2016. 330 с.
5. Бобрівник Л. Д., Логвін В. М. Хімічні процеси виробництв сахаридів : монографія. Київ : Експрес-Поліграф, 2014. 268 с.
6. Цукрова промисловість: традиції та інновації. Вітчизняний та світовий досвід : наук.-допом. бібліогр. покажч. / упоряд. О. В. Олаботі ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. Київ, 2018. 92 с.
7. Застосування мембранних процесів у технології одержання пектинових концентратів : монографія / Г. В. Дейниченко, В. Г. Мирончук, В. В. Гузенко та ін. ; Харків. держ. ун-т харчування та торгівлі. Харків : Факт, 2016. 176 с.
8. Рева Л. П. Фізико-хімічні основи технологічних процесів очищення дифузійного соку у виробництві цукру : монографія. Київ : НУХТ, 2015. 371 с.
9. Процеси і апарати. Механічні процеси і технології надвисокого тиску : підручник / В. С. Бойко, К. О. Самойчук, В. Г. Тарасенко та ін. Мелітополь : Люкс, 2019. 273 с.
10. Технологічні комплекси харчових виробництв : навч. посіб. / В. І. Теличкун, О. М. Гавва, Ю. С. Теличкун та ін. Київ : Сталь, 2017. 456 с.

Розділ 5. ПЕРЕРОБКА ТА ПОВТОРНЕ ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ ЦУКРОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ДЛЯ ОТРИМАННЯ РІЗНИХ ПРОДУКТІВ

5.1. Відходи цукрового виробництва і їх використання на практиці

Раціональне поводження з відходами, що утворюються під час виробництва цукру, є ключовим фактором у зменшенні навантаження на навколишнє середовище. У цьому розділі розглядаються фізичні, хімічні та біологічні методи повторного використання або переробки стічних вод та інших відходів цукрової промисловості для різноманітних застосувань. Багато країн активно інвестують у використання промислових цукрових відходів, таких як біомаса та стічні води, для виробництва відновлюваної енергії. Сьогодні різні технології отримання енергії зі стічних вод цукрової тростини — включаючи використання відпрацьованого тепла, інтеграцію технологічного тепла, генерацію біомаси, спалювання та газифікацію, анаеробне зброджування для біогазу, бродіння для біоетанолу, а також пряме виробництво електроенергії за допомогою мікробних паливних елементів — значно впливають на покращення екологічного стану. Повторне використання та переробка відходів цукрової промисловості підвищує прибутковість, створює додаткові робочі місця та сприяє розвитку економіки.

Цукрова тростина, Saccharum officinarum L. (Poaceae), є багаторічною культурою з товстими та волокнистими стеблами, яку вирощують у понад 100 країнах тропічного та помірного клімату. Виробництво цукрової тростини у період з 2000 по 2019 рр. становило близько 21% світового сільськогосподарського виробництва. Розширення площ під цукровою тростиною у світі призвело до зростання попиту на продукти, отримані з цієї культури. Понад 86% світового споживаного цукру виробляється з цукрової тростини, тоді як решта 14% здебільшого отримується з цукрових буряків.

У 2020 році світове виробництво цукрової тростини досягло 1 869,7 млн тон, з яких 757,1 млн тон зібрано в Бразилії, 370,5 млн тон — в Індії та 108,1 млн

тон — у Китаї. Розподіл виробництва серед п'яти найбільших регіонів-виробників виглядає так: Бразилія — 40%, Індія — 20%, Китай — 7%, Таїланд — 6% та країни Африки — 5%.

Багато країн виявили зацікавленість у розвитку біомаси як джерела палива після енергетичної кризи 1970-х років. Проте останні технологічні досягнення, що зробили викопні види палива відносно доступними, тимчасово знизили інтерес до біоенергетики. Водночас серйозні проблеми, пов'язані з високими викидами парникових газів, забрудненням повітря, нестабільними цінами на викопне паливо та зростанням світового попиту на транспортне паливо, стимулювали значні дослідницькі зусилля у сфері виробництва біоенергії.

Біоенергія — це енергія, отримана з палива, виробленого з біомаси. Оскільки біомаса є відновлюваним ресурсом, її розглядають як перспективну альтернативу для виробництва відновлюваної енергії. Історично люди використовували біомасу у вигляді дров для прямого спалювання. Сьогодні в країнах, що розвиваються, доступна велика кількість різноманітної сировини, включаючи відходи сільського та лісового господарства, будівельні та промислові відходи, а також тверді побутові відходи. Біопаливо, виготовлене з цієї сировини, відноситься до біопалива другого покоління. На відміну від біопалива першого покоління, отриманого з харчових культур, таких як цукрова тростина, картопля, пшениця та зернові, біопаливо другого покоління виробляють із лігноцелюлозної біомаси, зокрема соломи, деревини, проса та маніоку.

Перетворення відходів на біопаливо та використання залишків біомаси і відходів як основної сировини для його виробництва є інноваційним підходом до вирішення екологічних проблем і проблем утилізації відходів. Особливо це актуально для цукрової промисловості, яка генерує великі обсяги біомаси та рідких стоків, що потрапляють у воду чи на сушу. Рідкі стоки — це стічні води, що утворюються під час виробництва цукру.

Ряд досліджень зосереджений на можливості перетворення промислових стічних вод цукрової промисловості на цінні продукти для вирішення соціально-

екологічних проблем. Галузь також вивчає отримання побічних продуктів із залишків після обробки цукрової тростини, таких як жом, пресовий шлам (залишки після рідкої екстракції), патока (побічний продукт кристалізації цукру) та стічні води. Незважаючи на значний потенціал цих побічних продуктів, більшість відходів залишається невикористаною.

Останні дослідження зосереджені на очищенні стічних вод цукрової промисловості для їх повторного використання та перетворенні на біогаз з метою виробництва електроенергії. Мета цього розділу полягає у висвітленні сучасних зусиль щодо зменшення обсягів стічних вод у цукровій промисловості, а також визначенні ініціаторів цих ідей та їхніх потенційних бенефіціарів.

> **Бенефіціар** — це особа або організація, яка отримує конкретні вигоди або переваги внаслідок реалізації певного проєкту чи програми.

Крім того, фізичні, хімічні та біологічні методи очищення стічних вод у цукровій промисловості можуть застосовуватися й до стоків з інших джерел, а очищену воду можливо повторно використовувати для різних потреб. У цьому розділі розглядається використання рідких стоків цукрової промисловості для виробництва біогазу, який у подальшому застосовується для генерації електроенергії. Також обговорюються зацікавлені сторони, політичні рамки та країни, що активно впроваджують підходи до додавання економічної цінності стічним водам цукрової промисловості.

5.2. Перетворення відходів цукрового виробництва на біоенергію

Більшість цукру-сирцю, виробленого з цукрової тростини, надходить на переробку у цукрову промисловість для задоволення світового попиту. Зростання потреби у цукрі, разом із збільшенням населення, стимулювало швидке розширення цього сектору. Хоча розвиток цукрової промисловості сприяв створенню великої кількості робочих місць і економічному піднесенню в багатьох країнах, що розвиваються, збільшення обсягів виробництва супроводжується й ростом кількості відходів. Неналежна обробка та недостатнє

управління утилізацією цих відходів призводять до серйозного забруднення ґрунту та водних ресурсів.

Щорічно у світі утворюється близько 140 Гт відходів біомаси, що створює серйозні проблеми для екологічного управління через їхній шкідливий вплив на навколишнє середовище. Цукрова промисловість представлена у понад 130 країнах, особливо в менш розвинених регіонах, і виробляє різноманітні побічні продукти, такі як жом (залишки після дроблення цукрової тростини), пресовий шлам (залишки після рідкої екстракції), патоку (побічний продукт кристалізації цукру) та стічні води. Виробництво цих побічних продуктів створює додаткові робочі місця та сприяє зниженню безробіття, а їх продаж приносить прибуток і часто підтримує економіку країни.

Загалом процес виробництва цукру включає екстракцію соку, його освітлення, випаровування, кристалізацію та відцентрове відділення на цукрових заводах. Залежно від методу хімічної обробки виділяють дві основні технологічні схеми: карбонізацію та сульфурацію.

Окрім сприяння створенню робочих місць та економічному зростанню через виробництво цукру, відходи, що утворюються під час цих процесів, зокрема стічні води, можуть бути використані як сировина для виробництва біогазу та генерації енергії. Інвестування у переробку відходів цукрової промисловості має потенціал не лише для підвищення ефективності виробництва, а й для стимулювання глобального економічного зростання та створення додаткових робочих місць.

5.3. Стічні води сільськогосподарського сектору та промисловості

Сільськогосподарський сектор та промисловість споживають більшість прісної води, що особливо помітно у виробництві цукру, яке потребує значних обсягів водних ресурсів. Прісна вода використовується на цукрових заводах, утворюючи стоки різної кількості та складу. Кожен етап виробництва цукру

впливає на характеристики стічних вод, причому вихідна сировина, продукти та хімічні речовини визначають їх коливання.

Додатковими джерелами стічних вод є барометричні конденсатори, пиловловлювачі димових труб та скруберів, а також системи охолодження турбін і промивання. Водночас значна частина води, що використовується при переробці тростини, відновлюється під час операцій випаровування, кристалізації та очищення. Цукрова тростина містить близько 70–80% вологи, а промислове виробництво генерує приблизно 0,7–1 м³ стоків на кожну тону подрібненої тростини, залежно від країни та технології.

Однією з головних цілей управління стічними водами є усунення загроз від забруднюючих речовин для живих організмів і навколишнього середовища, як у теперішньому, так і у майбутньому. Очищення стічних вод є ключовим заходом для зменшення негативного впливу на екологію.

Виробники цукру значно впливають на забруднення води та ґрунту, випускаючи стоки з високою концентрацією твердих речовин, високим біохімічним споживанням кисню (БПК), високим хімічним споживанням кисню (ХПК), а також підвищеними рівнями хлоридів, сульфатів, нітратів, кальцію та магнію. Ці речовини мають несприятливий вплив на навколишнє середовище, сприяючи змінам клімату та глобальному потеплінню.

Згідно з четвертою доповіддю Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC), викиди вуглецю від біовідходів суттєво сприяють глобальному потеплінню та зміні клімату. Ці викиди призводять до танення льодовиків, підвищення рівня моря, руйнування екосистем, підвищення температури поверхні Землі та посилення стихійних лих, таких як урагани. Наслідком глобального потепління є вимирання видів, деградація їх природних середовищ існування та значні економічні втрати.

Дотримуючись цілей сталого розвитку Організації Об’єднаних Націй (UN SDG) щодо забезпечення чистої води та санітарії, доступної та відновлюваної енергії, сталого розвитку промисловості, інновацій, інфраструктури та заходів щодо кліматичних змін, понад 110 країн зобов’язалися досягти нульового

чистого викиду вуглецю до 2050 року. Генеральна Асамблея ООН (2015 р.) закликала всі установи, уряди та корпорації вжити невідкладних заходів для скорочення викидів вуглецю на 45% до 2030 року.

У світі зростає актуальність зменшення вуглецевого сліду від споживання енергії, особливо при використанні біомаси. Це пов'язано з великим сільськогосподарським сектором Китаю та діяльністю сільського населення, які спричиняють значні викиди парникових газів. Під час вирощування та обробки сільськогосподарських культур утворюються великі обсяги соломи та інших відходів, що є важливим джерелом біомаси.

Хоча дослідження досліджували потенціал сільськогосподарської біомаси Китаю для скорочення викидів вуглецю, ще небагато робіт присвячено стратегіям повного використання цих відходів для зниження парникових газів. Використання біомаси та стічних вод у таких цілях одночасно відкриває нові економічні можливості та сприяє створенню робочих місць.

Агентство з охорони навколишнього середовища США (EPA) встановлює жорсткі екологічні стандарти для переробки відходів у енергію. Ці норми передбачають використання технологій контролю забруднення повітря, таких як скрубери, тканинні фільтри та електростатичні фільтри. Скрубери очищають димові гази від кислот та інших забруднюючих речовин шляхом впорскування рідини в потік газів. Тканинні та електростатичні фільтри видаляють частки згоряння, забезпечуючи додаткове очищення. Зола, що накопичується на дні печі для переробки відходів, поєднується з дрібними частинками, відомими як летюча зола.

Однією з ключових проблем є те, що «продовольче» виробництво зазвичай оцінюють за їстівними частинами культури (індексом врожаю), при цьому не враховують неїстівні компоненти біомаси, незалежно від того, чи вирощуються вони для конкретного використання. Наприклад, цукрова тростина потребує переробки, що призводить до утворення додаткових вторинних та третинних потоків відходів крім основної біомаси, яка формується під час збирання. Таким

чином, відходи біомаси вважаються відносно постійним побічним продуктом сільськогосподарської діяльності.

У багатьох країнах, особливо тих, що розвиваються, більшість біомаси залишається неперероблено та неконтрольованою; її або спалюють на відкритому повітрі, або залишають для природного розпаду. Стічні води цукрових заводів є високозабрудненими: на кожну тону подрібненої цукрової тростини утворюється приблизно 1000 л стоків. Без належної очистки ці стічні води можуть забруднювати водні та наземні екосистеми. Уряди прагнуть зменшити їхній негативний вплив через впровадження технологій перетворення стічних вод на відновлювану енергію.

Вода надходить із зовнішніх джерел і залишає підприємство у вигляді стічних вод цукрових заводів і млинів, іноді з додатковими надходженнями з нафтопереробних підприємств. На відміну від автономних нафтопереробних заводів, що повністю залежать від зовнішніх водних ресурсів, млини мають потенціал функціонувати як чисті виробники води. Багато потоків стічних вод можуть повторно використовуватися, тому управління водою та стічними водами слід розглядати як взаємопов'язані процеси. Країни, такі як Канада, Китай, Індія та Німеччина, створили різні установки для перетворення стічних вод різної якості на біогаз.

У 1975 році уряд Китаю розпочав масштабну програму впровадження біогазу на національному рівні. Протягом кількох років щорічно будувалося близько 1,6 мільйона біогазових установок. Завдяки постійному технологічному прогресу до 2005 року Китай мав 17 мільйонів метантенків, які виробляли щорічно 6,5 мільярдів м³ біогазу. Приблизно чверть сільських домогосподарств у таких регіонах покладаються на біогаз для задоволення своїх енергетичних потреб. За останні роки дослідники з Китаю та Європи опублікували найбільше наукових статей про моделі та інструменти циклічної економіки у виробництві біогазу зі стічних вод.

Цукрова промисловість активно розвивається, щоб задовольнити зростаючий попит на цукор, а виробництво етанолу розширюється, оскільки

біоетанол стає доступним, недорогим та відновлюваним джерелом енергії. Однак значне забруднення ґрунту та води виникає через неналежну очистку та неконтрольоване скидання стічних вод підприємств цукрової тростини. У зв'язку з цим розробляються та впроваджуються методи перетворення біостоків цукрової промисловості на альтернативні джерела біоенергії.

Основним компонентом цукрових стічних вод є барда, побічний продукт процесу дистиляції етанолу після ферментації соку цукрової тростини. Барда являє собою суспензію органічних і мінеральних твердих речовин, що містить високі концентрації низькомолекулярних сполук, таких як спирти, цукри та органічні кислоти. Крім того, барда містить речовини, що надають відходам характерний колір і мають низьку біологічну розкладність, зокрема меланоїдини, карамелі та фенольні сполуки, включаючи гумінові та дубильні кислоти.

Vinasse має високий потенціал забруднення через значний вміст органічних речовин, калію, азоту, фосфору та сульфатів.

> **Vinasse** є побічним продуктом виробництва цукру або етанолу. Під час переробки цукрової тростини або цукрового буряка отримують кристалічний цукор, жом і патоку. Патоку та жом можна додатково ферментувати для виробництва етанолу, аскорбінової кислоти або інших продуктів. Сік цукрової тростини також може піддаватися безпосередньому етаноловому бродінню. Після видалення основного продукту, такого як спирт чи аскорбінова кислота, залишкова речовина отримує назву барда.

Завдяки сучасним технологіям стічні води можуть використовуватися для виробництва різноманітних продуктів з доданою вартістю, таких як біоенергія у вигляді водню (H_2) та метану (CH_4). Відновлюване біопаливо, виготовлене з відновлюваної сировини, називають біоводнем. Водень розглядається як перспективна альтернатива викопному паливу, оскільки є стійким джерелом енергії та потребує мінімальної кількості вуглеводнів або зовсім їх не використовує. При спалюванні водень утворює лише воду, не продукуючи парникових газів, тоді як біометан забезпечує виробництво тепла та електроенергії. Зростання ринку біометану спостерігається в багатьох країнах, серед яких Швейцарія, Франція, Данія та Південна Корея.

Корінь цукрового буряку, який містить високий рівень розчинного цукру, є ще одним важливим джерелом сировини для виробництва цукру задля задоволення світового попиту. Цю культуру вирощують на понад 8,1 мільйонах гектарів у 41 країні. Відомо, що виробництво цукру з буряків супроводжується утворенням стічних вод з високим хімічним споживанням кисню, що містять органічні сполуки вуглецю. Такі стоки мають значний потенціал забруднення через наявність розчинних та нерозчинних полісахаридів, патогенів, шкідників сільськогосподарських культур і залишків пестицидів, що негативно впливає на навколишнє середовище.

Застосування передових технологій дозволяє перетворювати ці стічні води на продукти з доданою вартістю, вирішуючи соціальні та екологічні проблеми, наприклад, зменшення навантаження на водні ресурси в Південній Африці. Проте для ефективного використання цих стоків необхідні подальші дослідження методів біоремедіації, що дозволять виробляти електроенергію та очищену воду, придатну для повторного використання в інших процесах.

Біоремедіація — це сукупність методів очищення води, ґрунту та повітря шляхом використання метаболічних здібностей живих організмів (рослин, грибів, комах, черв'яків, бактерій) або їхніх ферментів.

Основним джерелом стічних вод у цукровій промисловості є операції з очищення обладнання та виробничих приміщень. Значна частина стоків утворюється під час миття підлог у млинових цехах та інших котельнях, включно з випарниками, освітлювачами, вакуумними каструлями та центрифугами. Крім того, вода використовується для очищення установок з виробництва вапна, ротаційних вакуумних фільтрів та виконання інших періодичних процедур, що також формує стічні води.

До стічних вод органічні та неорганічні забруднювачі потрапляють під час регулярного очищення теплообмінників і випарників із застосуванням NaOH та HCl для видалення накипу з поверхні труб. Стоки також утворюються через витоки з насосів, труб та центрифуг, продувку котлів, переповнення бризкальних

басейнів і охолоджувальну воду конденсаторів, яка скидається як стічна вода після забруднення соком цукрової тростини.

Фізико-хімічні властивості та параметри стічних вод є важливими для їх ідентифікації та розуміння характеристик, що визначають ефективність методів очищення води. Це знання є критично важливим для інженерів-хіміків, оскільки дозволяє оцінити потенціал використання стічних вод як сировини для нових застосувань. Найбільше хімічне навантаження на стоки створюють тростинний сік і тверді речовини цукру, що втрачаються під час виробництва. Стічні води цукрової промисловості багаті на поживні речовини, включно із загальним азотом у концентрації 15–40 мг/л та загальним фосфором 1,3–12 мг/л. Рівень pH коливається від 4,5 до 10, а загальний вміст твердих речовин становить 6062–62 000 мг/л.

Колір. Колір стічних вод є якісним показником, який може слугувати для оцінки їх загальної якості. Світло-сірий або середньо-сірий колір характерний для стоків, що зазнали певного ступеня розкладання або деякий час перебували в каналізаційній системі. Світло-коричневі стічні води свідчать про те, що вони перебували в системі менше ніж 6 годин. Темні чорно-сірі або чорні води часто є септичними, оскільки піддалися значному бактеріальному розпаду в анаеробних умовах. Почорніння стоків зазвичай спричинене утворенням сульфідів, зокрема сульфіду заліза, що виникає при взаємодії двовалентних металів (наприклад, заліза) із сірководнем в анаеробному середовищі.

Запах. Неприємний або «рибний» запах стічних вод цукрової промисловості зумовлений газами, що виділяються під час анаеробного розпаду органічних речовин. Найпоширенішим є запах сірководню, що нагадує запах тухлих яєць.

Температура. Температура стічних вод впливає на біологічні та хімічні процеси у водному середовищі. Неочищені стоки мають температуру близько 40 °C, тоді як очищені — близько 30 °C.

Кислотність (pH). Концентрація іонів водню визначається через негативний логарифм pH. Значення pH впливає на швидкість біологічних реакцій

і виживання мікроорганізмів. Крім того, pH стічних вод може прямо впливати на якість ґрунту. Значення pH для очищених стоків становило 7,2, а для неочищених — 5,5.

Хлориди. Хлориди присутні в природній воді через розчинення соляних відкладень або скидання стоків із нафтових та хімічних підприємств. Додатковими джерелами хлоридів є дренаж, фільтрат сміття та проникнення морської води в прибережні зони. Концентрація хлоридів у неочищених стічних водах становила 205 мг/л, а в очищених — 170 мг/л.

Біохімічна потреба в кисні (БПК). Біохімічна потреба в кисні визначає кількість кисню, необхідного мікроорганізмам для розкладання органічних речовин у стічних водах в аеробних умовах. БПК є важливим показником, що відображає рівень забруднення води окислюваною органікою, а також кисень, витрачений на окислення неорганічних речовин, таких як сульфіди та іони заліза. Для неочищених стічних вод цукрових заводів БПК становила близько 970 мг/л, тоді як після очищення вона знижувалася до 300 мг/л. Під час літнього сезону вимірювана БПК коливалася в межах 635–950 мг/л.

Хімічна потреба в кисні (ХПК). ХПК оцінює кількість кисню, необхідного для хімічного окислення органічних речовин із застосуванням потужного окислювача. Цей тест дозволяє визначити рівень забруднення побутовими та промисловими стоками. При окисленні органічного матеріалу утворюється вуглекислий газ і вода. Використання тестів БПК та ХПК у поєднанні допомагає оцінити токсичні умови та природну стійкість системи. Для неочищених стічних вод ХПК становила близько 3682 мг/л і знижувалася до 300 мг/л після очищення.

Стічні води цукрової промисловості мають складний хімічний та фізичний склад, що створює проблеми для інженерів-екологів щодо їхнього управління та повторного використання. Виробництво цукру споживає приблизно 1500–2000 л води та формує близько 1000 л стічних вод на кожну тону подрібненої тростини. У процесі виробництва утворюється значна кількість відходів, включно із

зваженими частинками, органічними речовинами, пресовим шламом, жомом та іншими забруднювачами.

Оскільки виробництво цукру триває, стічні води цукрової промисловості залишаються постійним ресурсом. Розуміння їхніх фізико-хімічних властивостей є критично важливим для подальшого використання. Належна обробка стоків допомагає зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Один із найефективніших способів управління великою кількістю стічних вод — це використання їх для виробництва біоенергії та біогазу. Таке використання не лише зменшує забруднення, а й створює робочі місця, додає економічну цінність цукровій промисловості та сприяє розвитку економіки країни.

5.4. Виробництво біометану та H_2 палива зі стічних вод цукрової промисловості (останні дослідження та інновації)

Стічні води цукрової промисловості можуть слугувати відновлюваним джерелом енергії, що дозволяє одночасно зменшити вплив на навколишнє середовище та підвищити енергетичну безпеку. Використання енергії зі стоків сприяє інтегрованому управлінню водою, відходами та енергією в рамках підходу до сталого розвитку. Дослідження показали, що стічні води багаті поживними речовинами, які можуть бути використані мікроорганізмами для виробництва біоенергії, зокрема водню (H_2) та метану (CH_4). У зв'язку з цим було проведено численні дослідження щодо різних типів стічних вод для енергетичного використання. Було вивчено вплив конфігурації реакторів, попередньої обробки стоків, інокуляту, застосування спільних субстратів та інших процесних факторів на ефективність виробництва енергії. Незважаючи на значний потенціал стічних вод для повного розкладу органічних відходів, досі існує обмежена кількість досліджень, які демонструють послідовне та стабільне використання стоків для виробництва H_2 і CH_4.

Цілі, встановлені на 21-й Конференції сторін Рамкової конвенції ООН зі зміни клімату (COP21), стимулювали розвиток виробництва біопалива до 2030

року, зокрема сприяючи зростанню виробництва етанолу, що, у свою чергу, призведе до збільшення утворення SV. Незважаючи на високий потенціал забруднення через значну концентрацію органічних речовин і поживних елементів, SV може слугувати джерелом додаткових ресурсів через анаеробне зброджування, продукуючи леткі жирні кислоти (VFA), біоводень (bioH_2) та біометан (bioCH_4).

Водень (H_2) називають «чистим паливом», оскільки його згоряння не продукує шкідливих побічних продуктів, роблячи його екологічно безпечним. Це високоенергетичне паливо з теплотворною здатністю 3042 ккал/м³, що перевищує показники більшості традиційних палив. H_2 можна виробляти біологічним шляхом із різних відновлюваних ресурсів через світле та темне бродіння. Темне бродіння привертає особливу увагу дослідників завдяки м'яким умовам реакції та високій продуктивності, роблячи його більш привабливим порівняно зі світлим бродінням.

Крім H_2, біометан (CH_4) є екологічно чистим паливом, яке можна отримувати з широкого спектра біовідходів за допомогою анаеробного зброджування. Оскільки CH_4 є потужним парниковим газом, неконтрольоване утворення метану відходами може спричиняти глобальне потепління, що підкреслює важливість контрольованих методів перетворення відходів у CH_4. Мікроорганізми здатні використовувати залишкові метаболіти після генерації H_2 для виробництва CH_4, що значно підвищує ефективність використання відходів у процесі виробництва енергії.

Окрім H_2 і CH_4, біопалива зі стічних вод викликають значний науковий інтерес. Наприклад, з водоростей, що ростуть у стоках, можна виробляти біодизель.

Водночас біопереробні заводи утворюють великі обсяги стічних вод, зокрема барди. На кожен літр виробленого етанолу припадає 10–15 л барди, яка виводиться з дистиляційної колони при температурі близько 90 °C. Барда має високий потенціал забруднення через вміст органічних речовин і поживних елементів, таких як калій, азот, фосфор і сульфати. Через великі обсяги та

складний хімічний склад стічних вод, ефективне очищення барди залишається однією з головних проблем біопереробних заводів. Існують технології, які зменшують негативний вплив барди на навколишнє середовище, проте вони використовують лише невелику частину утворених відходів.

Одним із найпоширеніших методів утилізації барди є фертигація — безпосереднє внесення стічних вод у ґрунт для відновлення води та поживних речовин, що корисні для сільськогосподарських культур.

> **Фертигація (англ. fertigation)** — це процес введення добрив або пестицидів безпосередньо у систему зрошення. Технологія вперше була застосована у 1970-х роках і згодом отримала широке поширення у різних країнах світу.

Фертигація забезпечує ряд переваг, зокрема швидке внесення поживних речовин, мінімальні потреби у складних технологіях, підвищену продуктивність сільського господарства та часткову заміну хімічних добрив. Проте її широке і безконтрольне застосування може спричинити негативні наслідки, такі як засолення ґрунту, підкислення водойм, поширення неприємних запахів, викиди парникових газів та дисбаланс поживних речовин.

Vinasse містить високу концентрацію органічних речовин, здатних до біологічного розкладання, і підходить для обробки, насамперед за допомогою анаеробних процесів. Водночас фертигація не дозволяє повністю використати енергетичний потенціал барди. Через значний вміст органіки, яка може перетворюватися на біометан, біоводень та леткі жирні кислоти, анаеробне зброджування виступає ефективною альтернативою для переробки цих стічних вод. Дослідження можливостей виробництва енергії зі стічних вод дозволяє суттєво зменшити забруднення навколишнього середовища.

Барда являє собою суспензію органічних і мінеральних твердих речовин, яка містить значну кількість низькомолекулярних сполук, таких як спирти, цукри та органічні кислоти. Крім того, вона містить компоненти, що надають стокам колір і мають низьку біологічну розкладність, зокрема меланоїдини, карамелі та фенольні сполуки, такі як гумінові та дубильні кислоти.

Стічні води володіють високим потенціалом забруднення через значний вміст органічних речовин та поживних елементів, зокрема калію (K), азоту (N) та фосфору (P), а також через низький рівень pH і високу корозійну активність. Використання біологічних методів очищення, зокрема анаеробного зброджування, дає змогу відновлювати енергію та цінні ресурси зі стічних вод, такі як леткі жирні кислоти та поживні речовини, що залишаються після очищення. Переваги анаеробного зброджування включають мінімальне утворення осаду, зменшене споживання енергії, збереження більшості поживних речовин завдяки невеликим втратам на клітинний метаболізм і перетворення органічних відходів у метан, який можна використовувати як джерело енергії.

Анаеробне зброджування відходів і стічних вод дозволяє відновлювати ресурси, які можуть замінити невідновлювану сировину. Три основні сполуки, що утворюються в процесі анаеробного зброджування, — це леткі жирні кислоти (ЛЖК), біоводень ($bioH_2$) та біометан ($bioCH_4$). Барда з цукрової тростини завдяки високому вмісту біорозкладаної органіки має значний потенціал для забезпечення цих ресурсів і може використовуватися для виробництва біогазу на біопереробних заводах.

Для підвищення ефективності виробництва цих ресурсів важливим є контроль ключових параметрів процесу, таких як pH, тип інокулята, гідравлічний час утримування та температура. Наприклад, сезон збору цукрової тростини в Бразилії (квітень–листопад) обмежує доступність субстрату протягом 200–240 днів, що впливає на виробництво ЛЖК та $bioH_2$.

Анаеробне зброджування може виробляти один ресурс — ЛЖК, $bioH_2$ або $bioCH_4$ — або декілька одночасно. Виробництво одного продукту спрощує контроль параметрів і підвищує вихід, тоді як синтез кількох ресурсів підвищує їхню додану вартість, але ускладнює керування процесом через різні операційні вимоги. Наприклад, умови кислотогенного реактора можуть негативно впливати на метаногенний етап у двоступеневих системах, ускладнюючи отримання $bioCH_4$.

Інтеграція мембранних процесів дозволяє підвищити вихід продукту у порівнянні з традиційними двоступеневими реакторами, утримуючи метаногенні мікроорганізми в біореакторі, збільшуючи їх концентрацію та ефективність перетворення субстрату в CH_4.

Біометан ($bioCH_4$) утворюється на етапі метаногенезу завдяки діяльності архей, таких як Methanococcus, Methanosarcina, Methanospirillum і Methanolobus. Завдяки високому біорозкладаному органічному навантаженню та економічній життєздатності, використання барди цукрової тростини для виробництва біогазу є перспективним. Отриманий $bioCH_4$ можна конденсувати та використовувати як паливо для автомобілів, вантажівок або сільськогосподарської техніки, а також закачувати в трубопроводи.

Варто зазначити, що анаеробне зброджування не дає чистого біометану; може знадобитися додатковий етап обробки залежно від бажаної якості. Існують два основні методи обробки біогазу:

Очищення біогазу – видалення небажаних і токсичних молекул, таких як H_2S.

Підвищення якості біогазу – регулювання вмісту CO_2 для підвищення теплотворної здатності, перетворюючи біогаз на біометан із вмістом CH_4 95–99%.

5.5. Передові технології перетворення стічних вод цукрової промисловості в енергію

Існує низка технологій для отримання енергії зі стічних вод цукрової тростини. Серед них – інтеграція тепла відходів і технологічного тепла для зменшення енергетичних витрат, виробництво біомаси, спалювання та газифікація, анаеробне зброджування для генерації біогазу, ферментація для отримання біоетанолу, а також пряме виробництво електроенергії за допомогою мікробних паливних елементів.

Утилізація відпрацьованого тепла. Інтеграція технологічного тепла передбачає використання тепла, що міститься у стічних водах промислових

процесів. Згідно з термодинамічними принципами, рекуперацію відпрацьованого тепла можна реалізувати на будь-якому масштабі за умови наявності теплового градієнта між потоками та достатньої теплопровідності матеріалів. Ефективність теплообміну залежить від теплоємності та витрати стічних вод. Максимальний потенціал утилізації енергії досягається через плановане інтегроване застосування відпрацьованого тепла з використанням методу аналізу Pinch.

Виробництво біомаси для енергетики та поглинання вуглецю. Біомаса може бути ефективним джерелом енергії у різних формах і піддається термічній обробці (спалювання або газифікація), анаеробному зброджуванню або ферментації. Вона здатна забезпечувати рідке чи газоподібне паливо, пару, електроенергію або їх комбінацію для розподілених енергетичних систем. При оцінці потенціалу стічних вод для виробництва енергії слід враховувати розвиток організмів, таких як водорості, гриби та рослини, а також утворення осадів стічних вод. Однак використання цих відходів для виробництва біомаси може конкурувати з іншими шляхами отримання енергії. Мікробні системи — бактерії, дріжджі та гриби — метаболізують різні органічні сполуки при різних концентраціях, характеризуючись високою спорідненістю до субстратів навіть при низьких залишкових концентраціях. Процеси розділення фаз, наприклад відстоювання, дозволяють відокремити біомасу від стічних вод і перетворити її на концентрований ресурс для генерації енергії.

Спалювання та газифікація. Газифікація біомаси відбувається при нагріванні за обмеженого доступу кисню, що призводить до утворення синтетичного газу. Цей газ складається переважно з оксиду вуглецю, вуглекислого газу та водню і може бути використаний безпосередньо як паливо з теплотворною здатністю 8–14 МДж/кг (10–20 МДж/Нм³), або ж перетворюватися хімічними чи біологічними методами на рідке паливо. Наприклад, синтез за технологією Фішера-Тропша або переробка метанолу у бензин (Mobil) дозволяють отримувати синтетичну нафту. Крім того, анаеробні бактерії здатні конвертувати монооксид вуглецю в синтетичному газі у етанол, з

типовим виходом близько 340 літрів етанолу на тону твердих побутових відходів, біомаси або відходів тваринництва.

Анаеробне зброджування для виробництва біогазу. Класичні анаеробні системи очищення стічних вод зазвичай базуються на старих метантенках, таких як декантерні варки, септики або резервуари Імхоффа. У цих установках органічні відходи утримуються та поступово розкладаються на дні анаеробним мулом відповідно до існуючих технологій.

Сучасні високошвидкісні анаеробні реактори є найбільш ефективними для первинної обробки органічних стоків високої концентрації, таких як стічні води цукрової промисловості. Процес виробництва біогазу відбувається багатофазово за участю різних мікроорганізмів. Спершу сапрофітні бактерії здійснюють гідроліз, розщеплюючи складні органічні сполуки на більш прості речовини. Потім ацетогенні бактерії перетворюють ці продукти на органічні кислоти. Нарешті, метаногенні бактерії використовують ці кислоти для синтезу метану — основного компонента біогазу.

Біогаз зазвичай містить 50–70% метану, що робить його цінним відновлюваним джерелом енергії для промислового та сільськогосподарського використання**.**

Ферментація для виробництва біоетанолу. Біоетанол є поширеним відновлюваним рідким паливом і виробляється за допомогою ферментації цукрових або крохмалевмісних сировин. Його можна використовувати як самостійне паливо або змішувати з іншими рідкими видами палива для створення сумішей, таких як газоголь чи дизохоль.

> **Газоголь** – це спирт, отриманий із цукрової тростини.
> **Дизохол** – це суміш дизельного пального з етиловим спиртом, призначена для дизельних двигунів.

Прості вуглеводи, такі як глюкоза та фруктоза, зазвичай ферментуються в анаеробних умовах для виробництва біоетанолу. Це бродіння здійснюють численні дріжджові культури, зокрема Saccharomyces sp., а також деякі бактерії, такі як Zymomonas sp. Основною проблемою є використання потоків відходів, де органічний вуглець не представлений у вигляді простих цукрів. Для цього

застосовують хімічну або біологічну попередню обробку або інноваційні мікроорганізми, здатні переробляти широкий спектр органічних субстратів. Методи целюлозолітичної попередньої обробки перебувають у центрі сучасних досліджень. Через низький вихід етанолу під час бродіння (зазвичай близько 10% (об./об.)) необхідна енергоємна дистиляція. У стандартних біоетанольних установках на дистиляцію може витрачатися понад 30% теплової енергії, що виробляється біоетанолом.

Мікробні паливні елементи (МПЕ) є перспективною технологією одночасного очищення стічних вод та виробництва електроенергії. Вони використовують мікроорганізми як каталізатори для перетворення хімічної енергії органічних речовин (білків, жирних кислот, вуглеводів) на електрику в анаеробних умовах. Завдяки цьому МПЕ здатні генерувати біоелектрику з відновлюваних джерел, таких як стічні води цукрової промисловості, і отримали значне наукове та промислове значення за останні десятиліття.

Очищення стічних вод є ключовим етапом управління забрудненням, оскільки воно усуває шкідливі речовини та забезпечує повторне використання водних ресурсів. Традиційні методи включають фізичні, хімічні та біологічні процедури, які організовані у багатоступеневі системи: попередня, первинна, вторинна та третинна очистка.

Однак через різноманіття стічних вод у цукровій промисловості створення надійних та економічно доцільних рішень ускладнено. Концепція біопереробки та замкнутого циклу, що включає багатоступінчасті процеси, такі як біовідновлення, біоакумуляція та біосорбція з використанням різних мікробних штамів, забезпечує більш стале управління органічними відходами та виробництво продукції з високою доданою вартістю.

Для очищення стічних вод застосовують різні методи:

- Первинна очистка: фільтрація, осадження, вирівнювання навантаження.
- Вторинна очистка: лагуни, аеровані ставки, аеробна та анаеробна обробка, електрохімічна очистка.

Кожен метод має недоліки: лагуни економічні там, де земля дешева, але потребують великої площі, менш ефективні у холодному кліматі, створюють неприємний запах і сприяють розмноженню комарів; електрохімічна обробка іноді призводить до забруднення води матеріалом електродів або неефективності через окислення.

Рішення цукрової промисловості щодо перетворення відходів у енергію спрямоване на використання технологій, які дозволяють виробляти електроенергію під час очищення стічних вод, забезпечуючи при цьому екологічну безпеку. Сучасні методи скорочення обсягу стічних вод у цукрових заводах базуються на комплексних технологіях очищення, що забезпечують ефективне та економічно вигідне видалення забруднювачів.

Процеси очищення, включаючи переробку, повторне використання або перетворення стічних вод на біогаз і виробництво енергії, дозволяють значно зменшити обсяги відходів і негативний вплив на навколишнє середовище. Основні екологічні переваги таких технологій включають зниження потенційного забруднення та скорочення залежності від викопного палива, а економічна цінність стічних вод підвищується завдяки можливості отримання енергії.

Серед технологій, що використовують енергію стічних вод цукрової тростини, можна виділити: інтеграцію відпрацьованого тепла для зменшення енергетичних витрат, генерацію біомаси, спалювання та газифікацію, анаеробне зброджування для виробництва біогазу, ферментацію для отримання біоетанолу та пряме виробництво електроенергії за допомогою мікробних паливних елементів. Зокрема, високошвидкісне анаеробне зброджування останнім часом стало одним із найефективніших способів обробки органічно насичених стоків цукрової промисловості.

5.6. Продукти, отримані зі сміття цукрової тростини та багаси

Сміття цукрової тростини (bagasse) та барда можна використовувати для виробництва біоенергії. Зокрема, шляхом анаеробного зброджування

утворюється біогаз, основним компонентом якого є метан (CH_4). Цей газ може використовуватися для виробництва тепла, електроенергії або як транспортне паливо після очищення та підвищення якості. Крім того, під час темного ферментативного бродіння органічної частини стічних вод і відходів утворюється біоводень (H_2), який є "чистим паливом" з високою енергетичною цінністю. Анаеробне зброджування також виробляє леткі жирні кислоти (VFA), які можуть бути використані у біохімічних процесах або як добавки в промислових біореакторах.

Для виробництва рідких біопалив прості цукри багаси і барди ферментуються дріжджами (Saccharomyces sp.) або бактеріями (Zymomonas sp.) для отримання біоетанолу. Біоетанол може використовуватися як окреме паливо або у суміші з іншими видами пального. Зокрема, газоголь – це спирт із цукрової тростини для бензинових двигунів, а дизохол – суміш етанолу та дизельного пального для дизельних двигунів.

Відходи також можуть бути джерелом біомаси. Мікробна біомаса вирощується на стічних водах для виробництва палива або цінних біопродуктів. Її можна використовувати як корм для тварин, джерело ферментів або сировину для біопаливних систем.

Барда може перетворюватися на тверді біоресурси, наприклад компост або органічні добрива. У цьому випадку вона постачає поживні речовини для сільського господарства, включаючи калій (K), азот (N), фосфор (P) та мікроелементи.

За допомогою термічних процесів, таких як газифікація, можна отримати синтетичні гази (CO, H_2, CO_2), які надалі можна перетворювати на рідкі вуглеводні через синтез Фішера-Тропша, біотехнологічно отримувати етанол або перетворювати на метан. Також барда може слугувати живильним середовищем для вирощування водоростей з наступним отриманням біодизелю.

Ще один шлях – виробництво електроенергії за допомогою мікробних паливних елементів (MFC). Вони перетворюють органіку зі стічних вод і багаси

на електрику, одночасно очищуючи воду та зменшуючи навантаження на навколишнє середовище.

5.6.1. Хімічні речовини та паливо

Найефективніше застосування багаси в цукровій промисловості – спалювання її в котлі для виробництва пари, яка потім подається на турбіну для генерації електроенергії.

Цей підхід дозволяє економити зовнішнє паливо, забезпечує стійке виробництво електроенергії та зменшує обсяг відходів, водночас використовуючи побічний продукт виробництва цукру як цінний ресурс.

> **Багаса** – це побічний продукт цукрової тростини, який утворюється після її подрібнення та відділення соку. Вона містить волокнисту масу рослини, багату на лігнін і целюлозу, що робить її ідеальною для спалювання в котлах для виробництва пари та електроенергії.

Щоб отримати електроенергію та пару з багаси, її постійно спалюють у котлах на цукрових заводах. Поєднання жому та інших відходів цукрової тростини у відповідних пропорціях може використовуватися як паливо в інтегрованому циклі газифікатора та турбіни, що покращує відновлення енергії. Дослідження показують, що додавання інших відходів цукрової тростини та барди лікеро-горілчаних заводів до багаси може збільшити виробництво електроенергії до 500%. Водночас необхідно враховувати вартість, логістику постачання та конкуренцію за ресурси з іншими галузями.

Методи та технологія виробництва електроенергії з цукрової тростини та відходів лікеро-горілчаних заводів включають три основні етапи:

Утворення пари: спалювання жому вивільняє тепло його хімічної енергії. Це тепло використовується у котлі для нагрівання води до певної температури та тиску, що призводить до утворення пари.

Робота парової турбіни: турбіни, які перетворюють теплову енергію в механічну, приводяться в рух парою з котла. Це дозволяє обертати генератор з регульованою швидкістю.

Генерація електроенергії: обертання турбіни приводить у рух генератор, який перетворює механічну енергію на електричну, отримуючи змінний струм для подачі в мережу.

В даний час виробництво ксиліту здійснюється через хімічний процес каталітичного гідрування D-ксилози, отриманої з багаси як сировини. Ксиліт є замінним підсолоджувачем з високою доданою вартістю та антикарієсними властивостями, що робить його важливим продуктом як для біомедичної, так і для харчової промисловості.

Бразильська компанія Dedini SA повідомила про успішне виробництво етанолу в промислових масштабах з багаси, застосовуючи ефективну технологію попередньої обробки, яка поєднує використання органічних розчинників та розбавлений кислотний гідроліз.

Згідно з дослідженням економічної та екологічної оцінки комбінованого циклу газової турбіни з інтегрованою газифікацією біомаси у Бразилії, вплив на навколишнє середовище від парових турбін із конденсаційною екстракцією майже однаковий. Це свідчить про те, що термодинамічний та економічний аналіз є ключовим критерієм при виборі оптимальної системи для будівництва.

Крім того, кілька цукрових підприємств, зокрема в Індії, успішно реалізують надлишкове виробництво електроенергії, використовуючи відходи багаси для генерації енергії.

Сміття цукрової тростини зазвичай залишається розкиданим по полях, на відміну від багаси, яка утворюється та накопичується безпосередньо на цукрових заводах. Тому, якщо відходи планується використовувати на заводі для виробництва електроенергії, необхідно розробити ефективну систему збору та стимулювати її систематичне застосування.

Іншим підходом можуть бути децентралізовані методи переробки відходів для отримання продуктів з доданою вартістю. Наприклад, сміття цукрової тростини можна переробляти у деревне вугілля, порошок або брикети, які можна використовувати як паливо навіть у домашніх печах. Ця технологія та продукт поки що потребують оптимізації для масового виробництва.

Ще однією альтернативою є використання сухого листя та нижнього зеленого листя як мульчі. Мульча з сміття цукрової тростини підвищує родючість ґрунту, покращує здатність утримувати воду та аерацію ґрунту, допомагає контролювати бур'яни та підвищує врожайність культур, таких як арахіс і рицина.

Крім того, із целюлозних та геміцелюлозних компонентів сміття та багаси можна отримувати біорозкладні полімери та клеї шляхом біоконверсії. З багаси також виготовляють мікрокристали целюлози, які мають великий потенціал для зміцнення композитних матеріалів.

У фенольних смолах формованого типу компонент лігніну використовується як альтернатива фенолу та як інсектицид для боротьби зі шкідниками. Додатково, жом застосовується для створення наноструктурованих плівок, здатних адсорбувати важкі метали.

Адсорбенти. Багаса цукрової тростини зарекомендувала себе як економічно ефективний адсорбент для очищення водних потоків від різних забруднювачів. Зокрема, досліджувалася здатність багаси адсорбувати важкі метали, а також фенол і барвникові сполуки. Більшість наукових робіт зосереджені на рівновазі та кінетиці процесу адсорбції.

Ще з початку 1960-х років багаса використовувалася для отримання активованого вугілля, проте комерціалізація цього процесу досі дуже обмежена. Однією з причин є складнощі хімічної активації, яка забезпечує велику площу поверхні. При цьому утворюються відходи, наприклад, при використанні солей, таких як хлорид цинку, які потребують належної утилізації після процесу.

В Індії основним методом виробництва активованого вугілля є активація парою, проте існують додаткові проблеми, які обмежують економічну ефективність: віддалене розташування заводів активованого вугілля від цукрових підприємств та сезонна й нестабільна постачання багаси. Ці фактори значно впливають на загальну рентабельність процесу.

5.6.2. Продукти, отримані зі спаленої золи

Попіл цукрової тростини та його застосування як адсорбент. Утворений після спалювання попіл цукрової тростини можна поділити на дві категорії: важкий попіл і легкий попіл. Важкий попіл, який утворюється на електростанціях, має темно-чорний колір і характеризується високим вмістом вуглецю, що переважно пов'язано з неповним згорянням жому цукрової тростини. Легкий попіл має світло-чорний колір і низький вміст вуглецю, результат повного згоряння.

При спалюванні цукрової тростини при температурі 800°C зола виглядає сірою, тоді як при температурах вище 900°C вона стає білою через кристалізацію та термічний розпад компонентів. Золу жому цукрової тростини широко досліджували як недорогий адсорбент для видалення важких металів (нікель Ni, свинець Pb, селен Se, хром Cr, кадмій Cd, цинк Zn), а також для текстильних барвників, фенолів, похідних піридину та інших розчинних хімічних речовин.

Ефективність адсорбенту та безпечна утилізація або активація попелу ще залишаються недостатньо вивченими. Необхідно детально досліджувати вплив залишків матеріалу, їх токсичність для навколишнього середовища та здоров'я людей, а також методи відновлення адсорбенту й утилізації адсорбату.

Частина незгорілого вуглецю в золі цукрової тростини може служити попередником для активованого вугілля. Простими методами, такими як просіювання або гравітаційне відділення, можна виділити цю фракцію, а також обробити її кислотами для отримання активованого вугілля. Перевірка показала ефективність такого активованого вугілля у видаленні мікрозабруднювачів, таких як фенол.

З 1980 року спалена зола цукрової тростини використовується як адсорбент для різноманітних неорганічних і органічних забруднювачів. Однак проблеми залишаються: неоднорідність золи, складність обробки та утилізації адсорбату, а також економічна ефективність процесу. Перед використанням золи

як адсорбенту необхідно оцінити її вміст вуглецю та хімічний склад, а також забезпечити безпечну утилізацію з точки зору екології.

Керамічні фільтри з жому цукрової тростини. Нещодавні дослідження показали, що жом цукрової тростини може слугувати важливим матеріалом для виготовлення економічно ефективних керамічних мембранних фільтрів, придатних для різних процесів розділення газу та рідини. Керамічні мембрани мають такі переваги:

- ✓ Висока фізична та хімічна стабільність, особливо при високих значеннях pH та температурі.
- ✓ Тривалий термін служби у порівнянні з органічними полімерними мембранами.

Проте їх вартість приблизно в десять разів перевищує ціну органічних мембран, що обмежує широке використання. Відповідний розподіл пор за розміром можна отримати шляхом індивідуального налаштування керамічних мембран із попелу жому.

Було успішно досліджено застосування керамічних фільтрів із розміром пор від 1 мм до 10 мм у трьох основних напрямках:

- ✓ Очищення гарячого промислового газу з газифікатора біомаси. Фільтри використовувалися для видалення частинок перед очищенням смоли, що дозволяє ефективніше генерувати електроенергію.
- ✓ Занурений мембранний біореактор для очищення побутових та промислових стічних вод, включно зі стоками спиртового заводу. Фільтри утримували осад у біореакторі, покращуючи ефективність очищення.
- ✓ Процес виробництва цукру: сік цукрової тростини освітлювався для підвищення якості цукру та зменшення втрат патоки шляхом видалення частинок та колоїдних матеріалів з гарячого соку лайма.

Хоча для виготовлення керамічних фільтрів можна використовувати й вугільну золу, перевага попелу жому полягає в тому, що він не містить шкідливих речовин, таких як важкі метали, що робить його безпечнішим і екологічно дружнім матеріалом.

Біовугілля з багаси цукрової тростини. Коли біомаса багаси піддається термохімічному перетворенню, наприклад шляхом спалювання, газифікації, гідротермального зрідження, торрефікації або піролізу, утворюється тверда речовина, відома як біовугілля, яка містить вуглець і мінеральні компоненти.

У сільському господарстві біовугілля використовують для покращення структури ґрунту та мікробної активності, зокрема: здатності ґрунтового катіонного обміну, вмісту органічних речовин, регулювання pH ґрунту, покращення аерації ґрунту, підвищення водоутримуючої здатності.

Піроліз біомаси відбувається при температурах від 250 до 900°C в анаеробних умовах. Лігнін, целюлоза та геміцелюлоза, що входять до складу лігноцелюлозних матеріалів, піддаються хімічним реакціям, таким як деполімеризація, фрагментація та зшивання, утворюючи біовугілля, біопаливо та синтетичний газ.

Завдяки високому вмісту вуглецю, великій пористості та підтримці мікробної популяції, біовугілля має великий потенціал для підвищення родючості ґрунту, структури ґрунту, активності ґрунтових мікроорганізмів та поступового вивільнення поживних речовин.

Розмір пор істотно впливає на колонізацію біовугілля мікроорганізмами: великі пори колонізуються швидше, але не забезпечують захисту для ґрунтової мікрофауни; старіння біовугілля сприяє утворенню органічних сполук, які використовують ґрунтові мікроорганізми, створюючи сприятливе середовище для колонізації та росту бактерій.

Біовугілля виступає як пористе джерело вуглецю, що стимулює розвиток ґрунтової мікрофауни та підвищує продуктивність сільськогосподарських культур.

5.6.3. Інші продукти, отримані із золи жому

Застосування жомової золи у сільському господарстві та промисловості. Жомову золу можна використовувати як ґрунтову добавку для сільськогосподарських угідь. Проте вона має низьку поживну цінність, оскільки

містить недостатню кількість мінеральних елементів. Щоб покращити її харчову цінність для ґрунту, золу можна змішувати з пресовим шламом від фільтрації тростинного соку.

Брикетування золи із жому разом із зв'язуючими речовинами або добавками дозволяє отримати тверде паливо. Використання такого біопалива допомагає мінімізувати викиди вуглецю та сприяє захисту навколишнього середовища, адже добавки виготовляються з відходів біомаси або природних ресурсів.

Окрім цього, жомову золу досліджували як добавку до цементу та бетону. Вона може виступати як замінник піску у виробництві цегли, цементного розчину та бетону. Механічні властивості таких будівельних матеріалів покращуються, що робить її корисним компонентом у будівельному секторі.

Використання жомової золи у промисловості та переробці. Оскільки цементна промисловість виробляє близько 8% усіх антропогенних викидів CO_2, використання жомової золи як добавки до цементу може зменшити викиди парникових газів. Крім того, така утилізація знижує ціну будівельних матеріалів, зменшує навантаження на кінцеву утилізацію відходів, де витрати на зберігання зростають, і мінімізує забруднення ґрунту та повітря.

У секторі переробки каучуку альтернативні зміцнюючі речовини, такі як зола жому, необроблений жом та волокна жому, використовуються разом із натуральним каучуком для створення екологічно безпечних композитних матеріалів. Ці матеріали мають покращені механічні властивості, включно зі стійкістю до стиску, деформації, тертя та підвищеною твердістю.

Досліджено також використання незгорілої фракції вуглецю з жомової золи. Її площа поверхні становить 154,3 м²/г, що ідентично Carbon Black N339, який застосовується у протекторах шин легкових і вантажних автомобілів. Це дозволяє розглядати її як ефективний підсилювач матеріалів. З цієї фракції можна виготовляти гранули, додаючи інгредієнти на кшталт гліцерину або карбоксиметилцелюлози.

Порівняння теплотворної здатності показало, що зольні гранули мають аналогічну теплотворну здатність, як і некоксівне вугілля. Активоване вугілля, виготовлене з незгорілого вуглецю, може слугувати адсорбентом та каталізатором. Для масштабного застосування та комерціалізації цих технологій потрібні додаткові дослідження щодо продуктивності та ефективності.

5.6.4. Вироби з пресового шламу

Паливо та хімічні продукти. У наукових дослідженнях описано методи вилучення з пресового шламу цукрової тростини таких компонентів, як білки, віск і залишкові цукри. Завдяки цьому стало можливим отримувати мікрокристалічний віск із рівнем кристалічності, що відповідає характеристикам карнаубського воску.

> **Карнаубський віск** (також відомий як бразильський або пальмовий віск) отримують із листя пальми Copernicia cerifera, яка зростає у північно-східних регіонах Бразилія. Речовина офіційно зареєстрована як харчова добавка з індексом E-903.

Аналогічно, віск, отриманий із пресового шламу, знаходить широке застосування в різних галузях. Його використовують у косметичній продукції, для обробки поверхні фруктів і овочів, у шкіряній промисловості, виробництві паперових покриттів і текстилю, а також як компонент мастильних матеріалів, клеїв, поліролей та у фармацевтичній сфері. Порівняно з канделільським і карнаубським воском, цей вид воску є більш економічним.

Завдяки наявності довголанцюгових аліфатичних спиртів його можна застосовувати як допоміжний засіб для зниження підвищеного рівня холестерину. Воскову олію використовують у складі порошків для вогнегасників, лаків, як сировинний компонент і як ефективний протипінний агент. Крім того, віск застосовується у виробництві копіювального паперу для покращення роботи копіювальної техніки та принтерів, тоді як твердий віск, олія й смолисті фракції можуть слугувати пластифікаторами в шинній промисловості.

Пресовий шлам є значним ресурсом для виробництва біогазу завдяки високому вмісту метану. Процес біометанізації ефективно реалізується з

використанням цього матеріалу як основної сировини. Отриманий біогаз може застосовуватися як паливо для приготування їжі, а також як енергоносій для транспортних засобів. Окрім цього, залишковий продукт після зброджування використовується як цінне органічне добриво, що сприяє підвищенню родючості ґрунтів.

Пресовий шлам може використовуватися не лише самостійно, а й у поєднанні з іншими природними субстратами для інтенсифікації біогазоутворення. Метан утворюється під час анаеробного розкладання відходів цукрової тростини, причому використання лише пресового шламу забезпечує вихід метану на рівні близько 64,1 %. Додавання коров'ячого гною у співвідношенні 2:1 практично не змінює цей показник, тоді як співвідношення 1:1 спричиняє незначне зниження до 63,2 %.

Поєднання пресового шламу з багасою, навпаки, демонструє невелике зростання утворення метану — до 64,3–64,4 % залежно від пропорції змішування. Найбільш відчутний ефект спостерігається при додаванні серцевини очерету у співвідношенні 2:1, де вихід метану досягає 65,6 %. Включення інших рослинних залишків також підвищує виробництво біогазу приблизно на 20–30 %.

Додатково встановлено, що спільне анаеробне зброджування пресового шламу зі стічними водами бійні може збільшити утворення метану майже на 50 %. Водночас через обмежену кількість досліджень цей підхід потребує подальшого вивчення перед широкомасштабним впровадженням у практику сталого виробництва енергії.

Використання пресового шламу цукрової тростини разом із відходами лікеро-горілчаного виробництва є ефективним джерелом органічного добрива, що сприяє активному росту й розвитку рослин. Отримання біогазу з цього матеріалу шляхом анаеробного зброджування з додаванням мікроелементів, таких як залізо, кобальт і нікель, позитивно впливає на врожайність сільськогосподарських культур.

Біогаз, вироблений із пресового шламу, має низку переваг: він економічно доступний, характеризується високою теплотворною здатністю (близько 6 кВт·год/м³), є екологічно безпечним, сприяє ефективній конверсії енергії, створює робочі місця у сільській місцевості та може використовуватися як джерело децентралізованого енергопостачання. Завдяки значному вмісту органічних речовин пресовий шлам також придатний як сировина для виробництва біогазу в процесі анаеробної ферментації.

Крім енергетичного використання, пресовий шлам застосовують у твердофазній ферментації для отримання органічних кислот, зокрема лимонної та молочної. На одному з цукрових заводів у західній Індії була впроваджена технологічна установка, де вироблений біогаз транспортували трубопроводами до навколишніх домогосподарств. При цьому вихід біогазу становив приблизно 165 л на 1 кг пресового шламу за вмісту метану близько 60 %.

Інші дослідження показали, що в двофазному реакторі з 1 т сировини можна отримати до 9 м³ біогазу зі складом 70–75 % метану. Після зброджування залишковий матеріал має високий вміст азоту, фосфору та калію (N, P, K), що робить його придатним для використання як органічне добриво.

Водночас під час вилучення цінних компонентів із пресового шламу важливо забезпечувати контроль технологічного процесу, стабільність якості продукції та враховувати питання масштабування виробництва.

Пресовий мул цукрової тростини може використовуватися як корм для худоби. Клітковину, що міститься в пресі, можна включати до раціону тварин, а висушена на сонці багаса довгий час застосовується як джерело живлення для сільськогосподарських тварин. Дослідження також показали, що пресовий мул може входити до складу додаткових кормів і навіть впливати на розвиток риб.

Завдяки наявності цукрів та мінералів пресовий мул підходить для годування жуйних тварин, а також може використовуватися як ущільнювач при силосуванні кормів. При цьому деякі дослідження відзначають, що застосування ґрунтового добрива з пресового мулу може незначно підвищувати концентрацію важких металів, наприклад нікелю (Ni), у листках культур, таких як овес. Такий

накопичений метал може становити ризик для здоров'я тварин при регулярному годуванні.

Це свідчить про те, що метали в ґрунті по-різному переміщуються та накопичуються в рослинах, тому для оцінки безпечного використання рослин, вирощених на ґрунті, удобреному пресовим мулом, необхідні великі та повторні дослідження.

5.6.5. Інші застосування пресового шламу цукрової тростини

Дослідники постійно шукають способи ефективного використання пресового шламу в сільськогосподарській практиці для забезпечення рослин азотом і фосфором. Одним із перспективних методів є компостування — процес перетворення складних органічних відходів на цінні поживні речовини з екологічно безпечним застосуванням.

Під час компостування численні мікроорганізми, включно з бактеріями, актиноміцетами та грибами, розкладають органічні молекули до більш простих сполук, доступних для рослин. На цукрових заводах пресовий шлам зазвичай містить близько 69 % вологи, 10 % золи та 21 % летких твердих речовин (VS), із 74–75 % органічних речовин у складі твердих часток. Завдяки цьому шлам є ідеальним джерелом поживних речовин для розвитку мікроорганізмів і може ефективно застосовуватися для обробки відходів лікеро-горілчаних заводів.

Пресовий шлам можна компостувати окремо або у поєднанні з золою, бардою після дистиляції етанолу, тваринним гноєм, жомом та іншими рослинними відходами. При наявності дощових черв'яків, таких як Eisenia fetida або Eudrillus eugeniae, компостування може проходити у черв'якоподібній системі, що підвищує ефективність перетворення органічних речовин у цінний гумус.

Одним із найвідоміших методів біологічної стабілізації органічних відходів є компостування у поєднанні з вермікомпостуванням.

У цьому процесі органічні відходи не лише піддаються мікробіологічному розкладанню, а й переробляються дощовими черв'яками, такими як Eisenia fetida

або Eudrillus eugeniae. Вермікомпостування сприяє прискореному розкладанню органічної маси, підвищенню рівня поживних речовин у готовому компості, покращенню структури ґрунту, його аерації та водоутримуючої здатності.

Поєднання класичного компостування з вермікомпостуванням дозволяє ефективно стабілізувати пресовий шлам та інші органічні відходи цукрової промисловості, отримуючи високоякісні добрива з доданою цінністю для сільського господарства.

Вермикомпостування – це процес переробки органічних відходів. На відміну від традиційного компостування, де основну роль у перетворенні органіки в добриво відіграють ґрунтові мікроорганізми, у вермікомпостуванні активну участь беруть також дощові черв'яки. Через свою діяльність черв'яки подрібнюють органічну масу, збільшують площу поверхні для дії мікроорганізмів, прискорюють розклад матеріалу та насичують його поживними речовинами. Крім того, відходи, перероблені черв'яками, мають покращену структуру, більшу водоутримуючу здатність і підвищену біологічну активність, що робить вермикомпост цінним органічним добривом для сільського господарства.

Під час мікробного компостування органічна речовина швидше розщеплюється мікробами за регульованих умов. У цьому процесі органічний матеріал проходить термофільну стадію, яка дозволяє видалити шкідливі мікроби зі сміття, дезінфікуючи його. Цей метод також відомий як термофільне компостування або гаряче компостування.

Компостування зазвичай відбувається у дві стадії. Перша – термофільна стадія, під час якої розкладання органічних компонентів відбувається інтенсивніше, формуючи активну фазу компостування. Друга – стадія зрілості, коли температура знижується до мезофільного діапазону, а швидкість розкладання решти органіки значно сповільнюється.

Вермікомпостування – це базова біотехнологічна техніка компостування, у якій певні види дощових черв'яків використовуються для покращення перетворення відходів та отримання якісного кінцевого продукту. Воно схоже на

термофільне компостування, але ключова відмінність полягає в спільній дії черв'яків і бактерій, тоді як класичне мікробне компостування покладається виключно на мікроби.

Компостування пресового шламу з використанням вермікомпосту застосовується як носій для видів Azospirillum, а також як середовище для мікроорганізмів, що розчиняють фосфор. Розроблений біогумус можна використовувати на сільськогосподарських угіддях, а додаткові черв'яки сприяють відновленню верміпротеїну. Використання біогумусу у польових умовах стимулює розвиток рослин, пригнічує хвороби, покращує пористість ґрунту, підвищує активність мікробів та утримання води, а також аерацію. Завдяки підвищенню загального вмісту азоту, фосфору та калію біогумус є ефективним добривом. Крім того, вермікомпостування допомагає мінімізувати кількість шкідливих відходів, що потрапляють у навколишнє середовище.

Пресовий мул також використовується в аквакультурі, сприяючи процвітанню коропа. Ще одним важливим застосуванням є роль адсорбенту. Завдяки пористій структурі та наявності полярних груп пресовий мул може ефективно поглинати іони металів, барвники та інші хімічні речовини.

Пресовий шлам зазвичай застосовується як добриво, як у чистому вигляді, так і після біокомпостування зі стоками лікеро-горілчаних заводів. Ця стратегія вважається екологічно чистою, оскільки підвищує концентрацію азоту та фосфору в ґрунті. Однак деякі види компостів, наприклад із міських відходів, пов'язані з екологічними проблемами через стійкість важких металів та інших забруднювачів.

Нещодавні дослідження показали, що розкладання пресового шламу може утворювати кислотний фільтрат і виділяти значну кількість парникових газів, а також може призводити до іммобілізації неорганічного азоту.

Компостований пресовий мул містить поживні речовини, такі як N, P, K, Mg, Ca, а також мікроелементи Zn, Cu, Fe, Mn, які сприяють росту рослин. Як наслідок, компостований пресовий шлам є чудовим органічним добривом і

покращувачем ґрунту для довгострокових культур, сприяючи покращенню здоров'я ґрунту та його фізичних і біологічних властивостей.

5.7. Тверді відходи та побічні продукти

Діяльність цукрової промисловості продукує велику кількість твердих органічних відходів і побічних продуктів, таких як листя та луски, патока від остаточної кристалізації, пресовий шлам, волокно жому з тростини, шлам і ґрунт, а також вапняні тверді речовини від освітлення соку. Ці відходи, що утворюються переважно під час первинної обробки сировини, можуть містити залишки пестицидів і викликати екологічні занепокоєння. Обсяг утворення відходів залежить від якості сировини та первинного очищення в полі. Високоякісні відходи відкривають можливості для переробки у продукти з комерційною доданою вартістю, наприклад у виробництві паперу та ДСП.

Іншими джерелами твердих відходів є відпрацьований фільтрувальний матеріал (активоване вугілля), смоли з процесу іонного обміну, кислоти від хімічного очищення обладнання, барда або відпрацьована промивна рідина з перегонки ферментованого соку патоки та цукру, а також зола з парової котельні.

Було проведено дослідження виробництва паливних гранул із відходів фільтраційного осаду цукрової промисловості. Для цього застосовували пелетування на гідравлічному пресі під тиском 20–50 бар (2–5 МПа) для отримання гранул діаметром 1 см і висотою 1,25 см. Енергоефективність гранул покращували термічною обробкою «торрефікацією», під час якої зразки нагрівали до 200–300°C протягом 0,5–2 годин в атмосфері азоту.

Властивості паливних гранул охоплювали теплотворну здатність, насипну щільність, щільність гранул, приблизний хімічний аналіз та міцність на стиск. Результати показали, що мінімальний тиск для виробництва гранул без сполучного становив 30 бар. Теплотворна здатність гранул досягала 13 954–14 468 кДж/кг, що значно вище, ніж у непелетованої сировини (11 197 кДж/кг). Насипна щільність та щільність гранул становили відповідно 300–440 кг/м³ і 720–890 кг/м³.

Збільшення часу і температури торрефікації знижувало вихід гранул, проте паливні таблетки зберігали форму і не руйнувалися в умовах термічної обробки.

> **Торрефіковані деревні відходи** – це матеріал, отриманий із деревини шляхом низькотемпературного піролізу (зазвичай при 200–300 °C у безкисневому середовищі). У процесі торрефікації деревина втрачає частину вологи та летких сполук, що підвищує її енергетичну щільність, стабільність і довговічність. Через свої властивості торрефікат часто називають «новим вугіллям», оскільки він за своїми характеристиками наближається до вугілля: має підвищену теплотворну здатність, пористу структуру та підвищену горючість, що робить його перспективним паливним матеріалом для енергоефективного спалювання та виробництва гранул або брикетів. За рахунок низького вмісту води та летких компонентів торрефіковані відходи менш схильні до біологічного розкладання, зберігають форму при транспортуванні та подальшому зберіганні, що робить їх зручним і екологічним джерелом твердого біопалива.

Торрефіковані гранули показали значно підвищену теплотворну здатність – від 16 552 до 22 642 кДж/кг, а також вищий вміст вуглецю порівняно з гранулами без термічної обробки. У той же час спостерігалося зниження міцності на стиск, що зумовлено більш делікатною структурою матеріалу після торрефікації.

Рекомендовані умови для отримання оптимальних торрефікованих гранул з урахуванням термічних і фізичних властивостей – 300 °C протягом 1 години. Підготовлені гранули відповідають стандартам Таїланду, мають порівнянну теплотворну здатність із іншими видами палива та демонструють хороші показники для зберігання і транспортування.

Отже, фільтраційний осад цукрового виробництва має високий потенціал як сировина для виробництва твердих паливних гранул, що дозволяє перетворити відходи в ефективне біопаливо з додатковою енергетичною цінністю.

Питання для самоконтролю

1. Які відходи утворюються в результаті виробництва цукру?
2. Як можна перетворити промислові відходи цукрового виробництва на біомасу та далі на біопаливо?
3. Чи можливий продаж відходів переробки цукрової сировини і яким чином це здійснюється?
4. Які обсяги стічних вод утворюються під час промислового виробництва цукру?
5. За якими параметрами контролюють стічні води цукрового виробництва?
6. Як можна зменшити вуглецевий слід при використанні енергії, зокрема палива з біомаси?
7. Чи можуть неочищені промислові стічні води цукрового виробництва негативно впливати на водні та наземні екосистеми?
8. Які небезпеки становить барда цукрової тростини після видобутку цукру?
9. Що розуміють під терміном «біоремедіація»?
10. Як з відходів цукрового виробництва виробляють біометан і біоводень, і яка технологія переробки біовідходів при цьому застосовується?
11. Що таке анаеробне зброджування відходів?
12. Які радикальні методи застосовують на цукрових заводах для поліпшення стану навколишнього середовища та як відбувається утилізація виробничого тепла?
13. Що таке продукти «газоголь» і «дизохоль» та як вони утворюються?
14. Які сучасні методи використовують для очищення стічних вод цукрового виробництва?
15. Як найефективніше використовувати багасу в цукровій промисловості?
16. Чи може багаса служити ефективним адсорбентом для поглинання відходів цукрового виробництва?
17. Для яких цілей використовують золу, отриману із жому цукрового виробництва?

18. Які основні властивості керамічних фільтрів і для чого їх застосовують у цукровій промисловості?

19. Чи можна виготовити активоване вугілля із золи, отриманої шляхом спалювання жому?

20. Що таке пресовий шлам?

21. Чи можна застосовувати пресовий шлам для виробництва метану?

22. Як відбувається компостування пресового шламу?

23. Яким чином отримують торрефіковані гранули?

Рекомендована навчальна література

1. Технологія цукру = Sugar technology : підручник : у 3 т. Т. 1 : Вирощування, зберігання цукрових буряків, видобування сахарози / А. А. Ліпєц, В. М. Логвін, К. Д. Скорик та ін. ; за ред. В. М. Логвіна, А. І. Українця. Київ : Експрес-об'ява, 2015. 288 с.
2. Хомічак Л. М., Борисенко В. А., Кухар В. В. Технологія цукристих речовин : підручник. Київ : НУХТ, 2014. 415 с.
3. Рева Л. П. Фізико-хімічні основи технологічних процесів очищення дифузійного соку у виробництві цукру : монографія. Київ : НУХТ, 2015. 371 с.
4. Маринченко В. О., Домарецький В. А., Шиян П. Л. Технологія спирту : підручник. Київ : НУХТ, 2015. 420 с.
5. Теличкун В. І., Гавва О. М., Теличкун Ю. С. Технологічні комплекси харчових виробництв : навч. посіб. Київ : Сталь, 2017. 456 с.
6. Бобрівник Л. Д., Логвін В. М. Хімічні процеси виробництв сахаридів : монографія. Київ : Експрес-Поліграф, 2014. 268 с.
7. Тютюнник Ю. Г. Цукроварні України. Індустріальна спадщина і ландшафт : монографія / Ін-т еволюційної екології НАН України. Київ : АБС Пресс, 2016. 330 с.
8. Цукрова промисловість: традиції та інновації. Вітчизняний та світовий досвід : наук.-допом. бібліогр. покажч. / упоряд. О. В. Олаботі. Київ : НТУ НУХТ, 2018. 92 с.
9. Draycott A. P. Sugarbeet Technology. Oxford : Blackwell Publishing, 2006. 512 p.
10. Hugot E. Handbook of Cane Sugar Engineering. 3rd ed. Amsterdam : Elsevier Science, 1986 (reprint 2014). 1186 p.

Розділ 6. ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ ВИРОБНИЦТВА МЕДУ

Еволюція бджільництва нерозривно пов'язана з технологічним прогресом, який сприяв переходу від традиційних підходів до більш ефективних і продуктивних методів виробництва меду. У сучасних умовах галузь стикається з низкою викликів, зокрема зміною клімату, втратою природних середовищ існування та зменшенням чисельності бджолиних популяцій. Тому впровадження інноваційних технологій є необхідною умовою забезпечення сталого розвитку та стабільного виробництва меду**.**

6.1. Класифікація меду

За способом одержання мед поділяють на такі види:

стільниковий — реалізується безпосередньо в запечатаних бджолами стільниках;

самопливний — отримують шляхом природного витікання меду зі стільників, зазвичай під дією тепла (наприклад, на сонці);

центрифужний — видобувають за допомогою медогонки шляхом відцентрового відокремлення меду від стільників;

пресований — отримують шляхом механічного віджимання стільникової маси;

топлений (перетоплений) — виробляють із восковмісної сировини шляхом нагрівання з подальшим відокремленням меду.

Поділ меду на види здійснюють залежно від джерела його походження та способу отримання. Розрізняють бджолиний (натуральний) і штучний мед. Натуральний мед, своєю чергою, класифікують на квітковий (монофлорний і поліфлорний), падевий та змішаний.

Натуральний монофлорний мед — це мед, який виробляється бджолами з нектару, зібраного переважно з рослин одного ботанічного виду.

> **Монофлорний мед** — це продукт бджільництва, отриманий бджолами переважно з нектару одного виду рослин.

За видом рослин монофлорний мед отримує відповідну назву, наприклад: гречаний, липовий, буркуновий тощо. Теоретично кількість монофлорних видів меду могла б відповідати числу медоносних рослин, проте на практиці його добувають лише з окремих видів. Чистий монофлорний мед трапляється рідко,

оскільки до нектару основного медоноса майже завжди потрапляють домішки нектару інших рослин, що цвітуть одночасно.

Практично монофлорним вважають мед, у якому переважає нектар одного виду рослин. До монофлорного меду належать:

Світлі сорти: акацієвий, буркуновий, конюшиновий, кіпрейний, лавандовий, липовий, малиновий, соняшниковий, бавовняний, еспарцетовий.

Темні сорти: барбарисовий, вересковий, волошковий, гречаний, м'ятний.

Поліфлорний мед — це збірний мед, який виробляється бджолами з нектару декількох видів рослин. Назва поліфлорного меду пов'язана з типом медоносних угідь, з яких бджоли збирали нектар, наприклад: поліфлорний мед з лісових вирубок, гірсько-тайговий, степовий, луговий тощо.

Оскільки на таких угіддях цвітуть рослини різних видів, мед набуває різноманітних смакових та органолептичних властивостей. Він може відрізнятися за кольором (від білого до темного), ароматом (від ніжного до різкого), смаком (від приємного до терпкого чи гіркого) та кристалізацією (від дрібнозернистої до грубозернистої).

До поліфлорних (збірних) сортів меду належать: польовий, степовий, лісовий, фруктовий, гірський та інші.

Падевий мед — це мед, який виробляється медоносними бджолами з паді рослин. Його колір може варіюватися від майже чорного (наприклад, з листяних дерев) до світло-бурштинового (наприклад, з ялиці). Аромат падевого меду слабкий, а смак залежить від походження: часто має кислий або неприємний присмак. За солодкістю він значно поступається квітковому меду.

Консистенція падевого меду в'язка, тягуча, липка та клейка. За характером кристалізації він подібний до квіткового меду, проте у закристалізованому стані зберігає високу гігроскопічність. Падевий мед характеризується підвищеним вмістом мінеральних та азотистих речовин і вуглеводів, але містить менше глюкози та фруктози.

Для зимівлі бджіл падевий мед не придатний, оскільки його споживання може викликати падевий токсикоз. Визначити падевий мед можна за кольором,

смаком та ароматом, а для точного встановлення часто проводять хімічний аналіз.

Змішаний мед — це суміш квіткового та падевого медів. Залежно від того, яке джерело нектару або паді переважає в складі, його відносять або до квіткового, або до падевого меду.

Існує ще один різновид бджолиного меду — ***отруйний***, або п'яний мед. Він утворюється при переробці бджолами нектару рослин родини вересових, таких як азалія, багно, болотний верес та інші. Разом із нектаром бджоли переносять у мед отруйні речовини цих рослин, при цьому самі не отруюються. Основним токсичним компонентом п'яного меду є глікозид андромедоксін.

П'яний мед був відомий ще в давнину і отримав свою назву через ефект, який він викликає у людини: при його вживанні можуть з'являтися запаморочення, нудота, судоми та блювота, схожі на стан алкогольного сп'яніння. Зазвичай ці симптоми проходять самостійно протягом 48 годин без лікування.

За зовнішнім виглядом п'яний мед мало відрізняється від звичайного натурального меду, проте він менш ароматний і має характерний запах перепаленого цукру.

Експрес-метод або прискорений спосіб отримання меду передбачає підгодівлю бджіл солодким розчином, збагаченим різними додатковими речовинами. Такий мед містить підвищену кількість певних вітамінів, а також лікарських, поживних та інших корисних компонентів. Використовуючи цей метод, мед можна збирати не тільки навесні та восени, а й узимку, зокрема в тепличних умовах.

Штучний мед — це продукт, який отримують штучним шляхом, і для нього розроблено кілька сортів, наприклад: кавуновий, гарбузовий, фініковий, кукурудзяний. Його виробляють шляхом кип'ятіння та уварювання цукрових сиропів із додаванням кислот (лимонної або винної), у результаті чого сахароза розщеплюється на глюкозу та фруктозу. Для надання аромату до суміші додають невелику кількість натурального меду.

Штучний мед не містить ферментів, пилку та вітамінів. Під час випаровування соку відбуваються хімічні перетворення: зниження pH, інтенсивне потемніння та утворення опадів. Ці процеси особливо активні у термолабільних соках, тобто тих, що нестійкі до нагрівання.

Хоча штучний мед є цілісним продуктом, він не володіє багатьма властивостями натурального меду і, відповідно, не може повністю його замінити.

За способом отримання виділяють наступні види меду:

Монофлорний мед бджоли збирають переважно з нектару одного виду рослин.

Поліфлорний (змішаний) мед утворюється при переробці бджолами нектару, зібраного з різних видів рослин. Зазвичай його називають за типом медоносних угідь, де збирали нектар: лісовий, степовий, луговий, гірський тощо.

Колір змішаного меду може варіюватися від світлого або світло-жовтого до темного, але завжди залишатися прозорим. Аромат і смак залежать від складу рослин і можуть бути від ніжного та слабкого до різкого. Кристалізація може бути від салообразної до крупнозернистої.

Іноді змішаний мед містить домішки паді, що не зменшує його харчової та лікувальної цінності. Проте його не рекомендується давати бджолам під час зимівлі.

Акацієвий мед отримують із нектару квіток білої акації. Він відзначається високою якістю та приємними смаковими властивостями. У рідкому стані мед майже прозорий, з ніжним ароматом квітів акації та приємним смаком. Його pH становить близько 4,0.

Кристалізація проходить повільно, мед утворює дрібнозернисту структуру, а після закристалізації набуває молочно-білого кольору. Акацієвий мед відноситься до найкращих сортів і володіє помірними протимікробними властивостями.

Використовується як загальнозміцнюючий і заспокійливий засіб, при безсонні, шлунково-кишкових, жовчних та ниркових захворюваннях, а також при лікуванні очних хвороб і кашлю.

Мед з нектару квіток жовтої акації світлий за кольором; при кристалізації він набуває салоподібної консистенції, білого (молочного) кольору зі середньою зернистістю.

Барбарисовий мед має золотисто-жовтий колір, приємний аромат і ніжний солодкий смак. Бджоли активно переробляють нектар квіток чагарника барбарису звичайного, який росте в західних, центральних і південних регіонах нашої країни.

Лікувальні властивості барбарису та меду з нього були відомі ще стародавнім вавілонянам і індусам. Барбарисовий мед застосовують як цінний кровоспинний засіб, а також при лікуванні захворювань шлунково-кишкового тракту, каменів у нирках і тромбозів. Він відноситься до одного з найкращих сортів меду.

Бодяговий мед збирається в невеликих кількостях і характеризується приємним, насиченим ароматом. Його колір світлий, прозорий, із ніжним золотистим відтінком. За смаковими та якісними показниками цей мед схожий на липовий, відзначається м'яким солодким смаком і повільною кристалізацією. Бодяговий мед цінується як високоякісний сорт і використовується як харчовий продукт та для загальнооздоровчих цілей.

Глодовий мед має темний колір і злегка гіркуватий смак. Він застосовується при серцево-судинних захворюваннях, аритмії та для нормалізації підвищеного артеріального тиску. Рекомендований людям, які часто піддаються фізичним або психічним навантаженням, а також літнім особам як загальнозміцнювальний і тонізуючий засіб.

Будяковий мед відноситься до першосортних медів. Його колір може бути безбарвним, зеленуватим або світло-золотистим (світло-бурштиновим), а аромат і смак — приємні, м'які. Кристалізація проходить повільно, утворюючи дрібнозернисту структуру.

Бджоли активно збирають нектар з квіток малинового забарвлення бур'яну з колючими стеблами та сіруватим листям — будяка.

Будяковий мед використовується при серцево-судинних захворюваннях як тонізуючий засіб, при лікуванні гіпертонії та для зміцнення периферичних судин. Він стимулює секреторну діяльність шлунково-кишкового тракту та центральну нервову систему, а також володіє жовчогінною і в'язкою дією.

Бурачковий мед отримують із квіток огіркової трави. При відкачці він має світло-жовтий або янтарний колір, вирізняється яскравим ароматом і характерним смаком, що нагадує огірок.

Валеріановий мед має характерний аромат валеріани та солодкий, приємний смак. Він володіє вираженою заспокійливою дією на нервову систему і рекомендується при головному болю, безсонні, прискореному серцебитті та болях у шлунку.

Волошковий мед бджоли збирають із квіток синьої волошки (польової). Він має зеленувато-жовтий або світло-жовтий колір, ароматний, з приємним смаком і легким гіркуватим присмаком, що нагадує запах мигдалю. Цей мед відзначається високими смаковими та лікувальними якостями.

Мед із волошки лугової густішої консистенції, має більш темний колір і більш виражений аромат.

Вересовий мед має темний колір із червонуватим відтінком або коричневий, приємний смак і характерний аромат. Він дуже в'язкий і швидко застигає, що ускладнює відкачування з стільників. Мед із вересу може бути неоднорідним, іноді смугастим або складним за структурою.

При тривалому зберіганні вересовий мед не кристалізується, а набуває желеподібної консистенції. Він містить багато білкових та цінних мінеральних речовин. Для зимівлі бджіл такий мед непридатний. Його рекомендують людям із зниженим апетитом як поживний і загальнозміцнюючий засіб.

Горошковий мед збирають бджоли з квіток тонколистого горошку, переважно в степових районах. Мед прозорий, з приємним ароматом і м'яким смаком. Не слід плутати його з гороховим медом, який має темно-червоний колір.

Горошковий мед багатий на білкові та мінеральні речовини. Для зимівлі бджіл він непридатний, проте рекомендується людям із зниженим апетитом як поживний і загальнозміцнюючий продукт.

Горчишний мед має білий або золотистий колір і ніжний аромат. Він швидко кристалізується; pH становить близько 3,5. У відкритому посуді кристалізація відбувається протягом 4–5 днів, при цьому мед набуває жовто-кремового відтінку.

Горчишний мед відзначається високими поживними та лікувальними властивостями і рекомендується при захворюваннях органів дихання.

Гречаний мед має темно-жовтий колір із червонуватим відтінком, іноді майже коричневий, але завжди прозорий. Він відзначається специфічним ароматом і характерним смаком, що «щипає горло». При кристалізації мед перетворюється на салоподібну масу різної зернистості.

Гречаний мед містить 36–37% глюкози та 40–42% левульози, а також більше білків, незамінних амінокислот, мікроелементів і особливо заліза порівняно зі світлими сортами меду.

Застосовується при авітамінозах, для лікування і профілактики крововиливів у мозок та серце, покращує стан слизових оболонок і проникність капілярів. Рекомендується при гіпертонії у поєднанні з препаратами, що знижують тиск, при ревматизмі та інших захворюваннях. Особливо корисний при лікуванні хвороб, пов'язаних із кровотворенням.

Буркуновий мед бджоли збирають із обох видів буркуну — білого та жовтого (лікарського). Він відзначається високими смаковими якостями та тонким специфічним ароматом, що нагадує запах ванілі. Колір меду варіюється від білого з зеленуватим відтінком до світло-бурштинового, смак ніжний і приємний, іноді з легкою гіркуватістю.

Кристалізація проходить звичайно, утворюючи дрібнозернисту або грубозернисту структуру; закристалізований мед набуває білого кольору з кремовим відтінком.

Буркуновий мед застосовують при захворюваннях органів дихання, варикозному розширенні вен, геморої, а також при головному болю та безсонні. Особливо корисний при атонії кишечника, оскільки має виражену послаблюючу дію.

Дягілєвий мед бджоли збирають із квіток дягелю лікарського. Мед має приємний аромат і ніжний солодкий смак, завдяки чому користується популярністю серед споживачів. Він відзначається гарною прозорістю та світлим кольором, а його кристалізація проходить повільно, утворюючи дрібнозернисту масу. Дягілєвий мед цінується не лише за смакові якості, а й за корисні властивості — його застосовують як загальнозміцнювальний засіб і для підтримки здоров'я органів травлення.

Ожиновий мед бджоли виробляють із нектару квіток чагарника ожини, що широко поширений у природі. Мед практично прозорий, з приємним солодким смаком.

Він застосовується при лікуванні захворювань судинної системи, таких як атеросклероз, варикоз і геморой, а також при хворобах шлунково-кишкового тракту, камінні у нирках і тромбозах. Ожиновий мед цінується за свої лікувальні та загальнозміцнювальні властивості.

Змієголовниковий (маточниковий) мед бджоли збирають із синьо-фіолетових квіток однорічної ефіроолійної рослини — змієголовника молдавського, або маточника, який росте на Кавказі, Алтаї, в Криму та інших регіонах.

Мед світлий, прозорий, з приємним ароматом і ніжним солодким смаком. Змієголовник є цінною медоносною рослиною, оскільки містить велику кількість високоцукристого нектару з характерним лимонним запахом, що робить мед особливо ароматним і поживним.

Вербовий мед бджоли збирають із квіток різних деревних і чагарникових порід верби, яких налічується до 170 видів. Мед має бурштиновий або золотистий колір; при кристалізації стає дрібнозернистим із кремовим відтінком і відзначається приємним смаком.

Вербовий мед заготовлюється бджолами ранньою весною і зазвичай використовується в бджолиних сім'ях. Проте сильні сім'ї, що займають 10–11 вуликів, або спеціально створені медові сім'ї можуть дати товарного меду від 20 до 80 кг. Для зимівлі бджіл цей мед непридатний.

Ісоповий мед бджоли отримують із нектару темно-блакитних квіток лікарського та медоносного ісопу — ефіроолійної рослини, яка росте в дикому вигляді в Криму, Середній Азії, на Кавказі та Алтаї. Ісоп спеціально вирощують біля пасік як цінну медоносну рослину.

За своїми органолептичними властивостями ісоповий мед відноситься до першого сорту: він прозорий, ароматний, з приємним смаком і високою харчовою цінністю.

Каштановий мед отримують із квіток каштану кінського та їстівного. Мед із каштану кінського має світлий колір, а з їстівного — темний. Його pH становить близько 3,0. Каштановий мед дуже рідкий, має гіркуватий присмак і неприємний післясмак, швидко кристалізується великими кристалами.

За класифікацією відноситься до низькосортних медів, проте володіє вираженими протимікробними властивостями. Рекомендується при шлунково-кишкових та ниркових захворюваннях як лікувально-профілактичний засіб.

Кенафовий мед бджоли збирають із рослини кенаф. Свіжовідкачаний мед має жовтувато-каламутний колір і неприємний, гіркуватий смак, що знижує його харчову та споживчу цінність. За органолептичними властивостями він відноситься до низькосортних медів і рідко використовується як харчовий продукт. Часто його застосовують лише у змішаних сумішах із більш якісними сортами або у виробництві медових продуктів з додатковими ароматизаторами.

Кіпрейний (іван-чаєвий) мед бджоли збирають із нектару красивих лілово-червоних квіток зніту, або іван-чаю, який досить поширений в Україні, а в Нечорнозем'ї зустрічається у великій кількості, особливо на вирубках і гарях.

Мед прозорий, майже безбарвний, зі слабким ароматом і ніжним, невираженим смаком. Кристалізується досить швидко після відкачування, утворюючи білу дрібнозернисту або салоподібну масу.

Кіпрейний мед застосовують при запальних захворюваннях дихальних шляхів, як заспокійливий засіб при безсонні, а також для лікування гнійних ран завдяки його антисептичним властивостям.

Конюшиновий мед бджоли збирають із білого або повзучого конюшини. Мед із білого конюшини зазвичай світлий або світло-бурштиновий, має приємний аромат і характерний, ніжний смак, завдяки чому відноситься до кращих світлих сортів. Кристалізація найчастіше дрібнозерниста, рідше зустрічається грубозерниста або салоподібна.

Мед із рожевого конюшини за властивостями та смаком майже не відрізняється від меду білого конюшини, відзначається такими ж високими органолептичними і харчовими якостями.

Кленовий мед має бурштиновий колір із рожевим відтінком, приємний смак і специфічний аромат. Бджоли збирають його з жовтувато-зелених квіток клена гостролистого, який зустрічається майже у всіх лісах.

Мед відноситься до світлих сортів і відзначається чудовими смаковими властивостями, що робить його популярним серед споживачів як харчовий та лікувальний продукт.

Коріандровий мед бджоли охоче збирають із білих або злегка рожевих квіток ефіроолійної рослини коріандру (кінзи), яка росте в дикому вигляді в Середній Азії та Закавказзі, а в середній смузі культивується.

Завдяки високому вмісту ефірних олій, мед має різкий аромат і специфічний присмак. Він відзначається високими харчовими та лікувальними властивостями, особливо цінується за тонізуючу і стимулюючу дію на організм.

Кульбабовий мед має насичений золотисто-жовтий колір, дуже густу та в'язку консистенцію, швидко кристалізується. Він відзначається сильним ароматом і різким, «пекучим» смаком.

Бджоли збирають цей мед із нектару широко поширеної бур'янистої рослини — кульбаби. Мед містить близько 35–36% глюкози та 41–42%

Лавандовий мед відноситься до першого сорту та відзначається золотистим кольором і ніжним ароматом. Бджоли збирають його з нектару ясно-

синіх і блакитно-фіолетових квіток багаторічної ефіроолійної рослини лаванди, яка культивується в Криму, на Кубані та Кавказі.

Мед цінується за високі органолептичні якості, приємний смак і тонізуючі, заспокійливі властивості, завдяки чому використовується як харчовий і лікувальний продукт.

Ласточніковий мед бджоли виробляють із запашного нектару цінної медоносної рослини ласточніка (ваточника). Мед світлий із жовтуватим відтінком, має ніжний аромат і приємний солодкий смак.

У спекотну та суху погоду в сотах відбувається інтенсивне випаровування вологи, через що мед стає дуже густим і його важко відкачати навіть при легкому нагріванні. Він цінується за високі органолептичні властивості та лікувальні якості.

Липовий мед — один із кращих сортів меду, відомий надзвичайно сильним і приємним ароматом та характерним специфічним смаком, який легко розпізнається навіть у суміші з іншим медом. Колір меду варіюється від білого і прозорого до світло-бурштинового, рідше — жовтуватого або зеленуватого. Мед із липи маньчжурської має янтарно-жовтий колір і різкий приємний запах квітучої липи.

Липовий мед не містить лізину і гістидину, містить близько 39,27% фруктози та 34,96% глюкози, pH ≈ 3,7. Він володіє високими поживними і лікувальними властивостями та яскравою антибактеріальною дією, що проявляється проти грампозитивних і грамнегативних мікроорганізмів, а також проти інфузорій, амеб і трихомонад.

Мед має потогінну, відхаркувальну, протизапальну, заспокійливу та проносну дію. Його застосовують при ангіні, нежиті, ларингіті, бронхіті, бронхіальній астмі, для зміцнення серця, при запальних захворюваннях шлунково-кишкового тракту, нирок і жовчного міхура. Як зовнішній засіб використовується у вигляді мазей при лікуванні гнійних ран, опіків, екзем, запалень молочних залоз та інших запальних процесів.

Лопуховий мед бджоли збирають із темно-рожевих квіток лопуха волосистого та реп'яха. Мед світло-жовтого кольору з темно-оливковим відтінком, має різкий пряний аромат, дуже тягучий і запашний.

Він цінується за свій насичений смак і аромат, а також за високу поживну цінність і лікувальні властивості, зокрема як загальнозміцнювальний засіб та при захворюваннях шлунково-кишкового тракту.

Люцерновий мед має різні відтінки — від прозорого до янтарного, з приємним ароматом, що нагадує запах м'яти. При відносно високих температурах він майже не кристалізується, зберігаючи рідку консистенцію протягом тривалого часу.

Мед цінується за ніжний смак, легку засвоюваність і високі поживні та лікувальні властивості.

Малиновий мед бджоли збирають переважно з дикої малини, хоча не обходять увагою й садові рослини. Мед відзначається високою якістю, білим кольором, приємним ароматом і ніжним смаком.

Він особливо корисний при простудних захворюваннях, сприяє зміцненню імунітету та має загальнозміцнювальну дію на організм.

Морквяний мед має темно-жовтий колір і приємний аромат. Бджоли збирають його з нектару запашних білих квіток дворічної культурної рослини — моркви.

Мед відзначається ніжним, солодким смаком і високою поживною цінністю, а також корисними лікувальними властивостями, зокрема як загальнозміцнювальний і тонізуючий засіб.

М'ятний мед має характерний аромат м'яти та колір від бурштинового до червонуватого. Він багатий на вітамін С і кристалізується дрібними зернами світло-жовтого кольору.

Мед володіє жовчогінними, заспокійливими, болезаспокійливими, газогонними та антисептичними властивостями. Особливо цінується в Західній Європі за свій аромат, смак і лікувальні якості.

Осотовий мед має білий колір, приємний смак і виразний аромат, відноситься до першого сорту. Бджоли виробляють його з нектару широко поширеного бур'яну осоту, збираючи нектар із численних фіолетово-червоних квіток рослини.

Мед цінується за ніжний смак, високі поживні властивості та лікувальні якості, зокрема за заспокійливу та загальнозміцнювальну дію на організм.

Пастернаковий мед відноситься до світлих сортів і відзначається гарними смаковими якостями. Бджоли виробляють його з нектару великих жовтих квіток дворічної рослини пастернаку, яка росте в дикому вигляді в Поволжі та Башкирії.

За даними місцевих пасічників, пастернак у Башкирії займає друге місце серед медоносних рослин після липи, що робить його важливим джерелом нектару для бджіл у регіоні.

Соняшниковий мед рідкий, золотистого кольору, швидко кристалізується, набуваючи світло-бурштинового відтінку, іноді з легким зеленуватим або темнішим тоном. Його смак дещо терпкий.

Кристалізація меду грубозерниста, що робить текстуру щільною. Він цінується за високу енергетичну цінність, приємний аромат і лікувальні властивості, зокрема як джерело легкозасвоюваних вуглеводів.

Помаранчевий мед — один із кращих сортів меду, з ароматом, що нагадує запах квітів цитрусових, і приємним ніжним смаком.

Бджоли збирають його з нектару квіток цитрусових рослин — мандаринів, лимонів та апельсинів, які культивуються в Криму та на Кавказі. Мед цінується за високу якість, яскравий аромат і лікувальні властивості, зокрема за заспокійливу, тонізуючу та загальнозміцнювальну дію.

Пустирниковий мед має світло-золотистий колір, легкий аромат і характерний специфічний смак. Бджоли збирають його з квіток пустирника серцевого, який повсюдно росте на пустирях, уздовж доріг, на смітниках та інших відкритих ділянках.

Ці квітки містять багато високоцукристого нектару, завдяки чому пустирник є високопродуктивним медоносом. Мед цінується за поживні та

лікувальні властивості, особливо за заспокійливу дію на нервову систему і тонізуючий ефект.

Ріпаковий мед має білуватий або іноді жовтуватий колір, приємний аромат і солодкувато-нудотний смак із легким гіркуватим відтінком та гірчичним ароматом.

Мед дуже густий, швидко кристалізується великими зернами, іноді ще в комірках стільників, погано розчиняється у воді та при тривалому зберіганні може закисати. Він володіє високими поживними та лікувальними властивостями, цінується за енергетичну цінність і тонізуючий ефект.

Резедовий мед володіє виразним і приємним ароматом та ніжним смаком. Відноситься до високосортних медів і за якістю часто порівнюється з липовим. Бджоли збирають його з квіток запашної резеди.

Мед цінується за високі поживні та лікувальні властивості, зокрема за заспокійливу, тонізуючу та загальнозміцнювальну дію на організм.

Горобиновий мед виробляють бджоли з нектару квіток горобини звичайної. Мед має червонуватий відтінок, насичений аромат і приємний солодкуватий смак, який легко впізнається.

За своїми властивостями горобиновий мед відноситься до високоякісних сортів. Він багатий на мінерали, мікроелементи та органічні кислоти, що надає йому високу поживну цінність. Мед тонізує організм, зміцнює судини, покращує роботу серцево-судинної системи, сприяє загальному зміцненню імунітету та підвищенню життєвого тонусу. Його рекомендують при авітамінозах, слабкості, перевтомі та ослабленому імунітеті, а також як профілактичний засіб при сезонних захворюваннях.

Синяковий мед відноситься до першого сорту, має світло-бурштиновий колір, приємний аромат і насичений, приємний смак. Мед густий і повільно кристалізується, завдяки чому довше зберігає рідку консистенцію.

Бджоли виробляють його з квіток синяка, або рум’янки — цінної медоносної рослини, яка природно росте на півдні країни, а в інших регіонах

спеціально висівається для пасік. Мед відзначається високою поживною цінністю, лікувальними властивостями та тонізуючим ефектом.

Суріпковий мед має зеленувато-жовтий колір, слабкий аромат і приємний смак. Бджоли виробляють його з нектару квіток бур'яну суріпиці, що росте повсюдно, особливо поблизу озер, боліт та на вологих луках.

Мед швидко кристалізується і не придатний для зимівлі бджіл. Він цінується за харчові та лікувальні властивості, хоча через слабкий аромат відноситься до середньосортних медів.

Тютюновий мед виробляється в регіонах, де культивують тютюн. Його колір варіюється від світло- до темно-коричневого, pH ≈ 3,0. Мед має специфічний аромат і різко виражений присмак тютюну, через що його зазвичай не вживають у їжу.

Застосовується переважно на тютюнових фабриках для ароматизації тютюну. Незрілий (незапечатаний) мед містить токсичні речовини, які можна нейтралізувати термічною обробкою. Після цього він повністю придатний для підгодівлі бджіл під час зимівлі.

Гарбузовий мед виробляють бджоли з нектару квіток гарбуза та кабачка. Мед має золотисто-жовтий колір, приємний аромат і ніжний смак. Він швидко кристалізується, утворюючи дрібнозернисту або салоподібну масу, і цінується за свої поживні та лікувальні властивості.

Тюльпановий мед бджоли збирають з квіток декоративного тюльпанового дерева, яке є цінним медоносом через високу кількість нектару порівняно з іншими субтропічними рослинами.

Мед має червонуватий колір, приємний аромат і відмінні смакові якості. Він цінується за поживну цінність і тонізуючі властивості, а також за яскравий органолептичний профіль.

Фацелієвий мед має світлий або кремовий колір, ніжний квітковий аромат і приємний м'який смак. Він швидко кристалізується дрібнозернистою масою. Фацелія є однією з найцінніших медоносних рослин, яку висівають спеціально для пасік. Мед володіє тонізуючими, протизапальними та заспокійливими

властивостями. Рекомендується при анемії, слабкості, перевтомі та як загальнозміцнюючий засіб.

Хвойний мед відрізняється темним бурштиново-коричневим кольором, смолистим ароматом і характерним гіркуватим смаком. Кристалізується грубозернисто і повільно. Він збирається з хвойних дерев, таких як ялина, сосна або модрина. Мед зміцнює імунітет, має протизапальні та антисептичні властивості, корисний при простудних захворюваннях і проблемах дихальної системи.

Бавовниковий мед світлий, після кристалізації стає білим. Має специфічний аромат і ніжний смак. Кристалізується швидко, утворюючи дрібнозернисту масу. Мед збирається з квіток бавовнику, росте в південних регіонах, є високоякісним медом світлого сорту і добре зберігає смакові якості після кристалізації. Має заспокійливу і тонізуючу дію, корисний для травної системи.

Цикорієвий мед за смаком і зовнішнім виглядом схожий на польовий мед, але темніший, золотисто-коричневий. Аромат ніжний, квітковий, смак солодкий з легкою гірчинкою. Кристалізація середня. Мед збирається з нектару дикого або культивованого цикорію. Має протимікробні властивості, тонізує організм, корисний для печінки і травної системи.

Чорничний мед світлого кольору з червонуватим відтінком, має тонкий аромат і приємний солодкий смак з легкою терпкістю. Кристалізується повільно дрібнозернистою масою. Бджоли збирають його з квіток чорниці, що росте в лісових зонах. Мед багатий на антиоксиданти, зміцнює серцево-судинну систему та імунітет, корисний при анемії і для профілактики захворювань очей.

Шавлієвий мед має світло-бурштиновий колір і дуже приємний ніжний смак. Бджоли збирають його переважно з лікарської шавлії, яка широко культивується на Кубані та в Криму. Збір нектару з дикої (дібровної) шавлії незначний, тому такий мед зустрічається рідше. Мед володіє тонізуючими та заспокійливими властивостями, корисний для зміцнення нервової системи та при загальному виснаженні організму.

Шандровий мед відноситься до світлих сортів, має приємний аромат і високі смакові якості. Його виробляють бджоли з нектару квіток багаторічної рослини шандри білої, що росте на Кавказі та в Середній Азії. Нектар цих квіток концентрований і дуже ароматний, тому мед виходить насиченим і солодким. Він володіє тонізуючою дією, сприяє зміцненню імунітету та загальному підвищенню життєвого тонусу.

Евкаліптовий мед бджоли збирають з великих поодиноких квіток вічнозеленого евкаліпта кулястого, що росте в субтропіках. Цей мед має не надто виражений смак, проте високо цінується в народній медицині, зокрема при лікуванні захворювань дихальної системи, таких як туберкульоз легенів. Основна ефірна олія міститься у листках, але частково вона присутня і в нектарі, надаючи меду специфічні лікувальні властивості.

Еспарцетовий мед має золотисто-жовтий колір, насичений аромат і приємний смак. Бджоли отримують його з нектару квіток багаторічного еспарцету піщаного (посівного), що росте в дикому вигляді в середній смузі європейської частини Росії та південній частині Сибіру, а також культивується як кормова рослина в багатьох регіонах. Мед володіє гарними поживними властивостями, тонізує організм і сприяє зміцненню імунної системи.

Яблуневий мед світло-жовтого або жовтувато-коричневого кольору, відрізняється тонким приємним смаком і доброю якістю. У свіжому вигляді може трохи гірчити, проте при зберіганні гіркота зникає. РН = 3,5. Цей мед корисний для поліпшення обміну речовин, зміцнення серцево-судинної системи, а також рекомендується при легких розладах травлення.

Кропив'яний мед. Бджоли збирають кропив'яний мед з нектару квіток кропиви дводомної та інших видів кропиви. Мед має світло-жовтий або зеленувато-жовтий колір, приємний аромат і ніжний смак із легкою гірчинкою. Володіє високою поживною цінністю, багатий на вітаміни і мінерали. Рекомендується при анемії, для зміцнення імунітету та підтримки тонусу організму. Кристалізується дрібнозернистою масою.

Лимонниковий (мелісовий) мед. Цей мед бджоли отримують з квіток меліси лікарської або лимонника. Колір світлий, від блідо-жовтого до золотистого, аромат насичений лимонний, смак солодкий і приємний. Володіє вираженою заспокійливою дією на нервову систему, сприяє нормалізації сну, зменшенню стресу та тривожності. Крім того, має загальнотонізуючі властивості і підтримує роботу шлунково-кишкового тракту. Кристалізується дрібнозернисто.

Півонієвий мед. Бджоли виробляють його з нектару квіток півонії, що зустрічається як культурна і дикорosла рослина. Колір меду світло-жовтий, аромат насичений, квітковий, смак ніжний і солодкий. Мед має легку заспокійливу дію, покращує апетит і роботу шлунково-кишкового тракту. Володіє протизапальними властивостями та застосовується при перевтомі та стресах. Кристалізація дрібнозерниста, досить швидка.

Сон-трав'яний мед. Цей мед отримують бджоли з нектару польових квітів, зокрема сон-трави (сон-диво). Мед світло-жовтого або золотистого кольору, аромат слабкий, смак ніжний, з легкою трав'яною ноткою. Володіє заспокійливими та тонізуючими властивостями, допомагає при безсонні, нервовому перенапруженні і легких формах стресу. Кристалізується середньо швидко, утворюючи дрібнозернисту масу.

Чебрецевий (тим'яновий) мед. Бджоли збирають його з квіток чебрецю (тим'яну), поширеного на луках, схилах і сухих місцях. Колір меду світло-золотистий або бурштиновий, аромат сильний, трав'яний, смак пряний, з легкою гірчинкою. Мед має виражену протимікробну та антибактеріальну дію, корисний при захворюваннях дихальної системи, бронхіті, ангінах. Кристалізується середньо швидко, дрібнозернистий.

Мед манука – отриманий з чайного дерева, аромат і смак насичені, специфічні. Кристалізація повільна. Відомий як суперантибіотик, потужний антисептик, використовується при інфекційних та шкірних захворюваннях.

Гірський мед. Збирається бджолами на високогірних пасовищах та луках, де ростуть різні медоносні рослини. Колір меду може варіювати від світлого до

темного бурштинового, аромат насичений, смак різноманітний, залежно від рослин, з яких збирали нектар. Мед володіє високими поживними і лікувальними властивостями, підвищує тонус, зміцнює імунітет, добре впливає на серцево-судинну систему. Кристалізація дрібнозерниста або середньозерниста.

Лісовий мед. Бджоли отримують його з нектару рослин, що ростуть у лісових масивах: липи, акації, ягідних чагарників, трав'янистих медоносів. Колір світло-жовтий до темно-бурштинового, аромат насичений, смак солодкий і приємний, іноді з легкою гірчинкою. Володіє високими лікувальними властивостями, застосовується для зміцнення організму, при анемії, порушеннях сну та стресах. Кристалізація середньо швидка, дрібнозерниста.

Луговий мед отримують із нектару різноманітних лугових квітів, таких як кульбаба, дубниця, рокитник, чебрець, дика герань, конюшина, люцерна, чабер та інші. Колір меду варіюється від золотисто-жовтого до темно-коричневого, pH ≈ 3,5. Мед відзначається приємним, яскраво вираженим ароматом і гарним смаком, високими поживними і лікувальними властивостями. Він має протимікробну дію, а також пом'якшувальний, протизапальний та болезаспокійливий ефект. Якщо в меді переважає нектар кульбаби, він набуває більш насиченого жовтого кольору.

Падевий мед варіюється за кольором від світло-бурштинового до темно-бурого: світлі сорти утворюються з хвойних дерев, темні – з листяних. Аромат у нього слабко виражений, а смак солодкий, але менш приємний, ніж у квіткового меду. Для зимівлі бджіл падевий мед непридатний, проте люди можуть споживати його без обмежень. Він не лише безпечний, але й має високі лікувальні властивості завдяки підвищеному вмісту мінеральних речовин.

Хроматографічний аналіз показав, що падевий мед містить рафінозу, мальтозу, мелецітозу, сахарозу, глюкозу, фруктозу та ще сім невстановлених цукрів. Серед вільних амінокислот у ньому присутні: аланін, аргінін, аспарагінова кислота, цистин, глутамінова кислота, гліцин, гістидин, лейцин, лізин, метіонін, пролін, серин, тріонін, триптофан, тирозин і валін.

Завдяки високому вмісту мінеральних речовин і декстринів падевий мед сприятливо впливає на серцево-судинну та травну системи. Деякі сорти можуть мати неприємний присмак; у цьому випадку його можна прокип'ятити кілька хвилин, після чого присмак зникає, проте при цьому частково втрачаються лікувальні властивості.

У Західній Європі падевий мед цінується навіть більше, ніж квітковий. Мед з хвойних лісів особливо високої якості: за кольором, смаком і ароматом він часто не поступається квітковому. Заготовлюють його так само, як і квітковий, а на упаковці роблять позначку: «Мед падевий».

Кам'яний мед (інша назва – абхазький мед) – рідкісний і своєрідний вид меду. Його виробляють дикі бджоли, що живуть у скелях. Кам'яний мед має палевий колір, приємний смак і характерний аромат. Він представляє собою кристалічну субстанцію, подібну до льодяника.

Цей мед не потребує спеціальної тари, добре зберігається і протягом кількох років не втрачає своїх властивостей. Основними компонентами є цукри – переважно фруктоза і глюкоза, а також органічні кислоти та ферменти.

Колір кам'яного меду може варіюватися від майже безбарвного до дуже темно-коричневого, майже чорного. За консистенцією він буває рідким, кремоподібним або повністю кристалізованим. Смак і аромат залежать від ботанічного та географічного походження меду, що робить кожну партію унікальною.

Класифікація меду за в'язкістю. Весь мед, який знімають зі стільників, спочатку рідкий, але з часом піддається кристалізації. Різні види меду кристалізуються з різною швидкістю: деякі – через кілька тижнів, інші – через кілька місяців, а деякі можуть залишатися рідкими навіть рік і більше.

Основним фактором, що визначає в'язкість меду, є вміст глюкози. Чим її більше, тим швидше мед кристалізується та стає густим. Різниця між кремоподібним (дрібнозернистим) та рідким медом особливо важлива при його використанні – наприклад, у гарячих напоях або на хлібі. Водночас, в'язкість впливає і на смак, і на колір меду.

Класифікація за методологією пасіки. Методологія пасіки визначає, за яких умов і технологій отриманий мед, а також вплив цих умов на його якість, лікувальні властивості та безпеку для споживачів. Вона включає такі категорії:

1. Органічний мед. Органічний мед – це продукт, сертифікований незалежною організацією і вирощений відповідно до суворих екологічних стандартів. Основні критерії включають:

Екологічне походження: пасіки розташовані в регіонах, де немає промисловості, великих доріг, неорганічних сільськогосподарських угідь у радіусі 5–7 км. Бджоли збирають нектар тільки з природних луків, заповідників або органічних плантацій, де рослини не містять ГМО.

Підготовка до зимівлі: бджоли зимують на власному меді, а не на підгодівлі з цукрового сиропу або інших штучних добавок, що дозволяє зберегти природну структуру та ферменти меду.

Контроль шкідників і хвороб: бджолярі-органіки усувають кліщів варроа ручними або природними методами, без застосування синтетичних антибіотиків і хімічних препаратів.

Органічний мед характеризується високою чистотою, збереженням вітамінів, ферментів і мінеральних речовин. Він зберігає всі природні лікувальні властивості, що робить його цінним не тільки як харчовий продукт, а й як профілактичний та терапевтичний засіб.

2. Традиційний або натуральний мед. Цей мед збирають та обробляють за стандартними пасічними технологіями без застосування агресивних хімічних методів. Основні характеристики:

- ✓ Бджоли можуть зимувати на підгодівлі, але не повинні отримувати хімічні добавки.
- ✓ Продукт містить природні ферменти, вітаміни і пилок, що забезпечує харчову та лікувальну цінність.
- ✓ Для отримання товарного меду може застосовуватися механічне відкачування, але без додавання цукрового сиропу.

3. Штучний мед і змішані продукти. До цієї категорії належать медові продукти, які отримують шляхом обробки цукрових сиропів, екстрактів рослин або суміші з натуральним медом.

Штучний мед: отримують кип'ятінням і уварюванням цукрових сиропів з кислотами (лимонна, винна). Містить глюкозу та фруктозу, ароматизується натуральним медом. Не має ферментів, пилку, вітамінів. Використовується переважно як харчовий продукт.

Змішаний мед: комбінація квіткового та падевого меду. В залежності від переважного джерела може відноситися до квіткового або падевого. Зберігає частину лікувальних властивостей натурального меду.

4. Спеціальні методи отримання меду. Експресний (прискорений) метод: бджіл підгодовують солодким сиропом з додаванням вітамінів, лікарських або поживних речовин. Це дозволяє отримувати мед навесні, восени або навіть взимку в теплицях.

Методи для лікарських сортів: збір меду може проводитися з певних медоносних рослин, що забезпечує високий вміст лікувальних речовин.

6.2. Різновиди сирого меду

Під "сирим медом" зазвичай мають на увазі нефільтрований, необроблений мед, який не піддавався нагріванню, пастеризації чи механічній обробці, і зберігає максимальну кількість природних ферментів, вітамінів, пилку та ароматичних речовин. Різновиди сирого меду можна класифікувати за кількома ознаками: ботанічним походженням, кольором, ароматом, смаком та швидкістю кристалізації.

1. За ботанічним походженням. Монофлерний (монофлорний) мед: отриманий переважно з нектару одного виду рослин. Приклади: акацієвий, липовий, гречаний, каштановий, соняшниковий. Поліфлерний (змішаний) мед: збирається з нектару різних рослин. Може називатися за місцем збору: луговий, лісовий, степовий, гірський.

2. За природними властивостями. Кремовий мед: швидко кристалізується, дрібнозернистий, ніжний на смак, легко намазується на хліб. Рідкий мед: довго не кристалізується, часто світлий, легкий для використання в напоях та при приготуванні їжі. Густа/в'язка консистенція: наприклад, хвойний, вересовий, буряковий мед; важкий для відкачування зі стільників, може кристалізуватися нерівномірно.

3. За кольором. Світлі сорти: акацієвий, липовий, конюшиновий, кульбабовий. Темні сорти: гречаний, вересовий, хвої, каштановий, падевий.

4. За ароматом і смаком. Ніжний, делікатний: акацієвий, конюшиновий, лавандовий. Інтенсивний, пряний: гречаний, глодовий, шавлієвий, горчішний. Гіркуватий або специфічний: каштановий, тютюновий, евкаліптовий.

5. За походженням нектару та додатковими властивостями. Лікарські сорти: шавлія, меліса, маточник, пустирник, евкаліпт – містять специфічні лікувальні речовини. Падевий мед: збирається з виділень тлей на листках і хвойних деревах, багатий на мінерали, менш приємний на смак. Рідкісні види: кам'яний (абхазький), змієголовниковий, тюльпановий – специфічні за походженням і консистенцією.

6. За швидкістю кристалізації. Швидко кристалізується: гречаний, соняшниковий, ріпаковий, кульбабовий. Повільно кристалізується: акацієвий, луговий, люцерновий, вересовий.

6.3. Важливість бджіл

Медоносні бджоли відіграють надзвичайно важливу роль у підтримці здоров'я екосистеми. Вони є головними запильниками, відповідальними за запилення приблизно 80% сільськогосподарських культур, від яких залежить виробництво продовольства для людей та тварин. Без участі бджіл багато плодів, овочів, горіхів та інших культур не змогли б повноцінно розвиватися, що призвело б до значного зниження врожайності та дефіциту важливих продуктів харчування.

Крім того, бджоли забезпечують підтримку біорізноманіття, оскільки запилення допомагає розмноженню дикорослих рослин, які є основою багатьох екосистем. Це включає ліси, луки, болота та інші природні середовища, що формують харчові ланцюги для численних тварин.

Отже, роль медоносних бджіл виходить далеко за межі виробництва меду – вони безпосередньо впливають на продовольчу безпеку та стабільність природних систем. Тому збереження здоров'я бджіл, контроль за їх хворобами, забезпечення безпечних пасік та збереження природних медоносних рослин є критично важливими для підтримки нашої екосистеми та економіки сільського господарства.



Рис. 28. Інноваційна пасіка [28]

З огляду на постійне скорочення популяцій медоносних бджіл у всьому світі, бджолярство стикається з серйозними викликами. Це змушує пасічників активніше шукати інноваційні підходи та технології, які дозволяють більш ефективно керувати вуликами, одночасно підтримуючи сталий розвиток своєї діяльності. До таких рішень належать сучасні системи моніторингу стану сімей, автоматизація догляду за бджолами, використання органічних методів боротьби з шкідниками та оптимізація збору меду. Усе це не лише підвищує продуктивність пасік, але й сприяє збереженню здоров'я бджіл та їхньої

екологічної ролі як запильників, від яких залежить продовольча безпека та біорізноманіття планети.

Інтеграція технологій у бджільництво. Інтеграція розумних технологій у практику бджільництва відкриває широкі перспективи для підвищення ефективності роботи пасік. Наприклад, розумні вулики, оснащені датчиками, системами моніторингу та аналітичними платформами, дозволяють бджолярам відстежувати стан сімей у режимі реального часу без частих фізичних оглядів. Це забезпечує можливість керувати більшою кількістю вуликів без значного збільшення штату працівників, що в кінцевому результаті підвищує продуктивність та ефективність роботи пасіки.

Ключові переваги впровадження таких технологій включають:

- ✓ Моніторинг стану вуликів у реальному часі, що дозволяє швидко виявляти ознаки захворювань, нестачі їжі або стресових факторів.
- ✓ Визначення пасовищ з найвищою поживною цінністю, що оптимізує розміщення вуликів та підвищує якість і кількість меду.
- ✓ Надання аналітичних даних для покращення процесів прийняття рішень, включаючи планування збору меду, профілактику хвороб і підготовку до зимівлі.

Згідно з галузевими дослідженнями, такі платформи, як BeeWeb, показують обнадійливі результати, використовуючи передові технології для прогнозування здоров’я та продуктивності бджіл. Дослідження демонструють, що застосування цих інновацій може збільшити врожай меду до 30%, що робить їх впровадження перспективним стратегічним кроком для сучасного бджільництва.

Шлях уперед. У контексті розвитку майбутнього виробництва меду, для бджолярів критично важливо інтегрувати технології, засновані на даних, та підходи сталого розвитку. Впровадження методологій, які пріоритетно ставлять здоров’я бджолосімей та підвищення врожайності, відкриває широкі перспективи для розширення медової галузі. Проактивна адаптація до таких інновацій дозволяє не лише підвищити ефективність сучасних пасік, а й закласти

основу для стійкого та продуктивного бджільництва для майбутніх поколінь, забезпечуючи безпечне і стабільне постачання високоякісного меду.

6.4. Використання розумних вуликів у виробництві меду

Оскільки світ дедалі більше акцентує увагу на сталому розвитку та ефективності сільського господарства, вплив «розумних» вуликів на виробництво меду стає все більш помітним. Впровадження технологій у бджільництво не лише підвищує продуктивність пасік, але й відіграє ключову роль у підтримці здоров'я та життєздатності популяцій медоносних бджіл.

Сучасні розумні вулики оснащені передовими функціями, що дозволяють бджолярам отримувати цінну інформацію про динаміку розвитку колоній і швидко реагувати на зміни. Такі технологічні інновації значно змінюють спосіб взаємодії пасічників зі своїми вуликами та сприяють підвищенню ефективності управління бджолосім'ями.

Ключові характеристики розумних вуликів включають:

Моніторинг у режимі реального часу: датчики відстежують життєво важливі параметри, такі як температура, вологість і вага вулика, що дозволяє бджолярам отримувати негайні оновлення про стан колоній.

Аналіз даних: інтегроване програмне забезпечення забезпечує обробку історичних даних і тенденцій, що дає змогу приймати обґрунтовані рішення щодо управління вуликами та планування медозбору.

Віддалений доступ: завдяки підключенню до мережі бджолярі можуть контролювати стан вуликів із будь-якої точки світу, використовуючи смартфони або комп'ютери для отримання актуальної інформації та сповіщень.

Автоматизовані сповіщення: вулики здатні повідомляти власників про аномалії, такі як раптові перепади температури або інші екологічні ризики, що дозволяє своєчасно вжити заходів для захисту бджіл і збереження продуктивності.

Завдяки цим технологіям бджолярі можуть оптимізувати управління пасіками, зменшити втрати та підвищити врожай меду, одночасно забезпечуючи

стійкість та здоров'я бджолосімей, що є критично важливим для майбутнього бджільництва та продовольчої безпеки.

Завдяки широкому спектру функцій, що пропонуються розумними вуликами, бджолярі можуть застосовувати проактивний підхід до управління пасіками, що сприяє більш здоровому розвитку колоній та зменшує ризик втрат бджіл.

Переваги розумних вуликів. Впровадження розумних вуликів у виробництві меду виходить далеко за рамки простої зручності та надає бджолярам численні стратегічні переваги:

Підвищена продуктивність: використання даних у режимі реального часу дозволяє оптимізувати умови всередині вуликів, сприяючи більш ефективному збору меду, одночасно забезпечуючи здоров'я бджіл та стабільність колонії.

Зміцнення здоров'я бджіл: постійний моніторинг дає змогу на ранніх стадіях виявляти захворювання, шкідників або стресові фактори, що дозволяє бджолярам своєчасно втручатися та підтримувати благополуччя колонії.

Сталий розвиток: розумні вулики сприяють сталому веденню сільського господарства, оптимізуючи ресурси, зменшуючи необхідність у хімічних втручаннях та мінімізуючи негативний вплив на навколишнє середовище.

Покращене прийняття рішень: доступ до комплексної аналітики даних дозволяє бджолярам робити обґрунтовані вибори, наприклад, визначати найоптимальніші місця для розміщення вуликів, планувати режим годівлі або прогнозувати медозбір.

Перехід до розумних вуликів не лише сприяє збільшенню виробництва меду, але й підтримує більш широку стратегію збереження навколишнього середовища та сталого розвитку бджільництва. З розвитком технологій бджолярі, які впроваджують інновації, будуть краще підготовлені до ефективної роботи у складних сільськогосподарських умовах та забезпечення високої продуктивності своїх пасік.

Використання розумних вуликів дозволяє підвищити продуктивність та якість меду, забезпечуючи здоров'я бджолиних колоній. Моніторинг у реальному часі, аналітика даних та дистанційний контроль допомагають своєчасно виявляти ризики та оптимізувати умови утримання бджіл. Інтеграція таких технологій сприяє сталому розвитку бджільництва, зменшує хімічні втручання та підтримує екологічну безпеку, роблячи галузь більш життєздатною та перспективною.

6.5. Автоматизація медозбору

З розвитком технологій у бджільництві вдосконалюються й методи екстракції меду, стаючи більш ефективними, контрольованими та менш трудомісткими. Автоматизація процесу відкачування не лише спрощує роботу бджолярів, а й сприяє збільшенню обсягів виробництва, дозволяючи приділяти більше уваги здоров'ю та добробуту бджолиних колоній.

Автоматизовані системи екстракції меду. Однією з найважливіших інновацій у цій сфері стало створення автоматизованих медогонок, призначених для оптимізації вилучення меду зі стільників і зменшення фізичних навантажень, характерних для традиційних методів.

Ключові особливості таких систем включають:

Технологія Flow Hive. Ця інноваційна розробка дає змогу меду витікати безпосередньо з рамок вулика без їх розбирання. Завдяки цьому процес збору стає швидшим, менш стресовим для бджіл і значно скорочує час, необхідний для відкачування.

Ергономічний та інтуїтивний дизайн. Багато автоматизованих медогонок мають прості системи керування, що робить їх доступними для бджолярів із різним рівнем досвіду та не потребує тривалого навчання.

Точність і гігієнічність процесу. Автоматизовані рішення мінімізують ризик забруднення під час екстракції, оскільки мед одразу потрапляє в підготовлені чисті ємності, зберігаючи свої природні властивості, аромат і смак.

Отже, сучасні автоматизовані медогонки є важливим кроком уперед у розвитку галузі, допомагаючи бджолярам підвищувати ефективність виробництва та водночас забезпечувати безпечні й щадні умови для бджіл.

Підвищення ефективності завдяки автоматизації. Перехід до автоматизованого відкачування меду відкриває низку переваг, що безпосередньо впливають на результативність виробництва та організацію праці на пасіці. Основні з них:

Економія часу. Автоматизовані медогонки суттєво скорочують тривалість збору меду, даючи змогу бджолярам швидше проводити відкачування та ефективніше обслуговувати кілька бджолиних сімей одночасно.

Збільшення врожайності. Завдяки стабільному й контрольованому процесу екстракції забезпечується більш повне вилучення меду зі стільників, що сприяє підвищенню сезонного виходу продукції.

Підвищення трудової ефективності. Автоматизація дозволяє меншій кількості працівників обслуговувати більшу кількість вуликів, звільняючи ресурси для інших важливих робіт — догляду за бджолами, профілактики захворювань і моніторингу стану колоній.

Покращення якості продукції. Чистіші та технологічно контрольовані умови екстракції зменшують ризик забруднення, що дає змогу зберегти природні властивості меду, його аромат, смак і біологічну цінність.

Упровадження автоматизованих технологій допомагає бджолярам ефективніше долати виробничі виклики, поєднуючи підвищення продуктивності зі сталим веденням господарства. Такий підхід не лише оптимізує процес отримання меду, а й сприяє збереженню здоров'я бджолиних популяцій, формуючи більш перспективне майбутнє галузі.

6.6. Методи точного запилення

Оскільки сучасне сільське господарство змушене реагувати на скорочення чисельності природних запилювачів і водночас забезпечувати зростаючі потреби людства в продовольстві, методи точного запилення набувають особливого

значення. Такі інноваційні підходи не лише підвищують урожайність культур, а й створюють сталі доповнення до традиційного запилення за участю бджіл.

Одним із найперспективніших напрямів точного запилення є використання дронів — безпілотних літальних апаратів, які змінюють підхід фермерів до забезпечення запліднення рослин. Основні переваги застосування дронів у цьому процесі полягають у такому:

Цілеспрямоване запилення. Дрони можуть переносити пилок і точно наносити його на квітки, забезпечуючи оптимальну кількість для ефективного запліднення.

Широке охоплення територій. Вони здатні швидко обробляти великі площі та досягати важкодоступних ділянок, де природне або ручне запилення є ускладненим.

Підвищення ефективності. Контрольоване внесення пилку збільшує відсоток зав'язування плодів і, як наслідок, сприяє зростанню врожайності.

Компенсація зменшення популяцій запилювачів. В умовах втрати середовищ існування та впливу пестицидів дрони можуть частково доповнювати природне запилення, знижуючи ризики для агровиробництва.

З подальшим розвитком технологій роль дронів у сільському господарстві лише зростатиме, підкреслюючи важливість точного запилення як одного з ключових інструментів забезпечення продовольчої безпеки та сталого розвитку аграрної галузі.

Удосконалення процесів запилення. Окрім використання дронів, у сучасному сільському господарстві активно впроваджуються й інші технології точного запилення, що суттєво підвищують ефективність агровиробництва. Такі інноваційні підходи спрямовані на оптимізацію процесу запліднення рослин, зменшення втрат пилку та забезпечення стабільності врожаю.

Контрольований розподіл пилку. Спеціалізовані технології дають змогу точно дозувати та спрямовувати пилок на конкретні квітки, мінімізуючи його втрати та гарантуючи достатню кількість для повноцінного запліднення.

Аналітика на основі даних. Завдяки використанню сенсорів, метеостанцій і цифрових платформ фермери можуть відстежувати фази цвітіння, погодні умови та інші фактори довкілля, визначаючи найбільш сприятливий час і способи проведення запилення.

Оптимізоване управління посівами. Інструменти точного землеробства дозволяють оперативно коригувати агротехнічні заходи на основі даних у реальному часі, що сприяє підвищенню стабільності врожайності та ефективнішому використанню ресурсів.

Сприяння сталому розвитку. Часткове зменшення залежності від природних запилювачів у технологічних операціях допомагає адаптувати агросистеми до скорочення їхніх популяцій, забезпечуючи екологічно збалансоване ведення господарства.

Інтеграція технологій точного запилення в аграрну практику фактично трансформує підходи до вирощування культур. Поєднання цифрових рішень, автоматизації та аналітики даних дає змогу не лише підвищити врожайність, а й ефективно реагувати на сучасні виклики, пов'язані зі змінами клімату та зменшенням чисельності природних запилювачів. У перспективі такі технології стануть основою більш продуктивного, ресурсоефективного та екологічно стійкого сільського господарства.

6.7. Аналіз даних в управлінні вуликами

В останні роки впровадження цифрових технологій та аналізу даних у бджільництво суттєво змінило підходи до управління пасіками. Такі інновації не лише сприяють покращенню стану бджолиних колоній, а й забезпечують оптимізацію процесів виробництва меду.

Моніторинг здоров'я вулика. Однією з ключових умов ефективного бджільництва є можливість своєчасно й точно оцінювати стан вуликів. Сучасні системи моніторингу, оснащені різноманітними сенсорами, дозволяють відстежувати низку важливих показників. Постійний контроль температури та вологості допомагає виявляти небезпечні зміни мікроклімату, що можуть

призвести до перегріву, надлишкової вологи або розвитку хвороб. Використання вагових датчиків дає змогу оцінювати інтенсивність медозбору, визначати оптимальний час відкачування меду або необхідність підживлення. Датчики активності бджіл дозволяють аналізувати їхню поведінку та продуктивність: зниження активності часто сигналізує про стресові фактори, нестачу кормової бази або проблеми зі здоров'ям. Безперервний моніторинг забезпечує своєчасне втручання пасічника, знижує ризик втрат і покращує загальне управління колоніями.

Прогнозна аналітика у виробництві меду. Поряд із моніторингом у реальному часі дедалі більшого значення набуває прогнозна аналітика, що базується на обробці історичних даних і виявленні закономірностей. Аналіз моделей кормозбору дає змогу оптимально розміщувати вулики з урахуванням наявності медоносних рослин та поведінки бджіл, що підвищує ефективність медозбору. Прогностичні інструменти допомагають раціонально управляти ресурсами, передбачаючи обсяги виробництва залежно від погодних умов, стану колоній і кормової бази. Використання аналітичних моделей також сприяє ранньому виявленню ризиків захворювань: аналіз відхилень у даних дозволяє вживати профілактичних заходів ще до появи явних симптомів. Крім того, статистичне моделювання дає можливість прогнозувати врожайність меду, що полегшує довгострокове планування діяльності пасіки.

Застосування інструментів аналізу даних надає бджолярам суттєві переваги в умовах сучасного аграрного виробництва. Подальший розвиток технологій розширюватиме можливості цифрового управління пасіками, забезпечуючи більш ефективне, стале й науково обґрунтоване виробництво меду та збереження здоров'я бджолиних популяцій.

6.8. Сталий розвиток виробництва меду

З ростом попиту на мед та підвищенням усвідомлення екологічної відповідальності, стале виробництво меду набуває особливої важливості. Такі методи не лише підтримують здоров'я бджолиних популяцій, а й відповідають

принципам регенеративного сільського господарства, забезпечуючи довготривалу життєздатність медової галузі.

Органічні методи бджільництва. Органічні підходи відіграють ключову роль у сталому вирощуванні меду, забезпечуючи позитивний вплив на навколишнє середовище. Основні аспекти органічного бджільництва включають:

Природні методи догляду за бджолами: органічні бджолярі надають пріоритет здоров'ю та благополуччю колоній, застосовуючи природні способи боротьби зі шкідниками та хворобами й уникаючи синтетичних хімікатів.

Управління кормовими ресурсами та середовищем існування: висаджуючи різноманітні квіткові та кормові культури без пестицидів, пасічники сприяють активному та здоровому збору нектару бджолами. Це покращує якість меду та загальний стан колоній.

Мінімальне втручання у вулик: органічні практики передбачають обмежене порушення внутрішнього середовища вулика, що зменшує стрес у бджіл, сприяє зміцненню здоров'я колоній і підвищенню врожайності меду.

Застосування таких органічних методів забезпечує більш здорові та продуктивні бджолині колонії, одночасно підтримуючи екологічну стійкість та високу якість виробленого меду.

Впровадження сталих методів бджільництва не лише підвищує якість меду, але й сприяє розвитку екологічно відповідального сільського господарства.

Зусилля щодо збереження біорізноманіття. Біорізноманіття критично важливе для підтримки екосистем і послуг, які вони надають, зокрема запилення. Стале виробництво меду допомагає зберігати біорізноманіття через такі підходи:

Різноманітні посадки: заохочення вирощування різних видів рослин у сільськогосподарських ландшафтах забезпечує бджіл широким спектром джерел їжі, сприяючи здоровішим колоніям.

Відновлення середовища існування: відновлення місцевої флори та зменшення монокультур створює сприятливі умови для запилювачів і покращує екологічну стійкість.

Підтримка місцевих запилювачів: поряд із доглядом за медоносними бджолами сталі практики включають створення сприятливих умов для місцевих видів запилювачів, що підвищує стійкість екосистем.

Залучення громади: участь у місцевих екологічних ініціативах і освітніх програмах підвищує обізнаність громадськості щодо значення запилювачів і стимулює колективні дії для захисту цих ресурсів.

Таким чином, інтеграція сталих методів бджільництва підтримує не лише здоров'я бджолиних колоній, а й довготривалу екологічну стабільність сільськогосподарських систем.

Сталий розвиток медової галузі є не лише корисним, а й критично необхідним для майбутнього бджільництва та сільського господарства. Поєднуючи методи органічного землеробства з активними заходами збереження біорізноманіття, бджолярі можуть суттєво сприяти формуванню сталих і регенеративних агросистем. Ці підходи забезпечують виробництво меду, що задовольняє потреби споживачів, одночасно підтримуючи здоров'я екосистем і планети.

З огляду на інтеграцію сучасних технологій та сталих практик, стає очевидним, що майбутнє виробництва меду має великі перспективи для розвитку ефективного, безпечного та екологічно відповідального бджільництва.

Підкреслення ролі технологій. Сучасні технології в бджільництві вже не є просто опцією – вони стали необхідністю для оптимізації результатів та підвищення ефективності виробництва меду. Основні аспекти включають:

Ефективне використання ресурсів: бджолярі спочатку повинні максимально ефективно використовувати наявні ресурси; оптимізація традиційних методів може значно покращити виробництво меду.

Інноваційні рішення: технології, такі як розумні вулики, автоматизовані медогонки та методи точного запилення, здатні суттєво підвищити врожайність, сприяючи одночасно прибутковості та сталому розвитку галузі.

Навчання та освіта: доступ до сучасних знань і ресурсів щодо передових практик дозволяє бджолярам підвищувати стандарт виробництва меду, впроваджуючи ефективні методи та збільшуючи загальний врожай.

Сталий розвиток як фундамент майбутнього бджільництва. Сталий розвиток є визначальним чинником для подальшого розвитку бджільництва та забезпечення стабільного виробництва меду. Впровадження практик, орієнтованих на сталість, створює умови для процвітання бджолиних колоній, одночасно гарантує, що виробництво меду здатне задовольняти зростаючий попит споживачів на продукцію відповідального походження. До ключових аспектів сталого розвитку у бджільництві належать:

Збереження біорізноманіття: підтримка різноманітності видів запилювачів та охорона їхніх природних середовищ існування сприяє зміцненню здоров'я популяцій медоносних бджіл, підвищує стабільність та стійкість екосистем, у яких вони мешкають. Це забезпечує природну рівновагу та сприяє сталому функціонуванню екосистем, необхідних для ефективного запилення сільськогосподарських культур.

Органічні методи бджільництва: застосування органічних підходів у бджільництві дозволяє зменшити використання синтетичних хімікатів і пестицидів, що покращує загальний стан здоров'я бджіл і якість меду. Органічні практики також відкривають нові ринкові можливості, залучаючи споживачів, які цінують продукти екологічно чистого походження та підтримку сталого розвитку.

Майбутнє бджільництва значною мірою залежить від інтеграції сучасних технологій із сталими практиками. Використання інноваційних технологій дозволяє вирішувати проблеми неефективності управління вуликами, підвищувати продуктивність та забезпечувати більш ефективний контроль за здоров'ям бджолиних колоній. Поєднання технологічних рішень із принципами сталого розвитку сприяє збереженню природних ресурсів, покращенню умов для бджіл і забезпеченню ***стабільності виробництва меду на довгострокову перспективу.***

Координація зусиль окремих бджолярів, сільськогосподарських організацій, дослідницьких установ та місцевих громад є критично важливою для формування стійкого майбутнього галузі. Такий підхід дозволяє не лише підвищити врожайність меду, а й покращити здоров'я бджолиних колоній, зберегти біорізноманіття та дотримуватися принципів сталого сільського господарства, забезпечуючи баланс між потребами людей і екологічною відповідальністю.

6.9. Методи управління заради максимізації виробництво меду

Для бджолярів, які прагнуть максимально ефективно виробляти мед, життєво важливо застосовувати стратегічний підхід, що поєднує глибокі знання, сучасні технології та принципи сталого розвитку. Ефективні методи управління дозволяють підвищити продуктивність вуликів та значно збільшити врожай меду.

1. Вибір правильного виду бджіл. Вибір відповідного виду бджіл є ключовим фактором для досягнення оптимального рівня виробництва меду. Різні види бджіл відрізняються поведінкою при пошуку їжі, темпераментом та продуктивністю. Основні міркування включають:

Італійські бджоли: відомі своїм спокійним характером та високою медоносністю, вони особливо популярні серед бджолярів у тепліших регіонах.

Крайські бджоли: відмінні збирачі меду, добре пристосовуються до різних кліматичних умов, що робить їх ефективним вибором для багатьох регіонів.

Російські бджоли: стійкі до хвороб і шкідників, можуть зберігати продуктивність навіть у складних умовах, що забезпечує стабільність врожаю.

Вибір виду бджіл із врахуванням місцевих кліматичних та екологічних умов істотно впливає на загальну продуктивність вулика.

2. Впровадження ефективних методів управління вуликами. Оптимальне управління вуликами є необхідною умовою для підтримки здорових та продуктивних колоній. Серед ефективних методів управління слід виділити:

Регулярні огляди: планові перевірки колоній для контролю здоров'я бджіл, виявлення хвороб та оцінки роботи матки.

Запобігання роїнню: впровадження заходів, що зменшують ризик роїння, наприклад, забезпечення достатнього простору у вулику та заміна старих стільників, допомагає підтримувати високий рівень виробництва меду.

Стратегії підживлення: додаткове підживлення бджіл у періоди, коли природних джерел нектару мало, особливо ранньою весною або пізньою осінню, сприяє підтриманню продуктивності колонії.

3. Покращення умов у вуликах за допомогою технологій. Сучасні технології значно полегшують управління вуликами та підвищують ефективність виробництва меду:

Системи моніторингу вуликів: розумні вулики з датчиками температури, вологості та ваги надають дані в режимі реального часу про стан колонії та потенційні проблеми.

Автоматизовані медогонки: сучасні пристрої для відкачування меду дозволяють підвищити продуктивність і чистоту процесу, зменшують витрати праці та забезпечують максимальний збір меду.

Аналіз даних: використання аналітики для відстеження тенденцій у виробництві допомагає приймати обґрунтовані рішення щодо розподілу ресурсів та управління вуликами.

4. Сприяння сталому розвитку. Принципи сталого розвитку мають бути основою стратегій виробництва меду:

Різноманітні посадки: заохочення вирощування різних квітучих рослин у навколишньому середовищі забезпечує бджіл постійним джерелом нектару та пилку.

Органічні практики: використання природних методів боротьби зі шкідниками та хворобами підтримує здоров'я бджіл і сприяє виробництву високоякісного меду.

Застосовуючи ці методи управління, бджолярі створюють сприятливі умови для максимізації виробництва меду. Продуманий вибір видів бджіл,

ефективне управління вуликами, інтеграція технологій та дотримання сталих практик дозволяють досягати високих врожаїв, роблячи бджільництво більш прибутковим та екологічно відповідальним.

6.10. Збільшення виробництва меду

Збільшення виробництва меду потребує комплексного підходу, який поєднує стратегічне планування, своєчасне втручання та глибоке розуміння природного життєвого циклу бджолиних колоній. Адаптуючи сучасні методи бджільництва відповідно до сезонних потреб колонії, бджолярі можуть значно підвищити врожайність меду.

1. Розуміння життєвого циклу сезонної колонії. Визнання циклічної природи бджолиних колоній є ключовим для оптимізації виробництва меду. Кожна пора року приносить свої особливості та виклики:

Весняне управління: Після зимового періоду бджоли починають активний пошук доступних квіткових ресурсів. Бджолярам слід забезпечити колонії достатнім простором для розширення та уникнути перенаселення, що може призвести до роїння.

Літній фокус: Влітку бджоли активно збирають та зберігають мед. Для ефективного управління колонією важливо: забезпечити достатню кількість супер-коробок для зручного зберігання меду; регулярно перевіряти колонії на ознаки хвороб та підтримувати міцне здоров’я бджіл.

2. Вирощування та догляд за матками. Здоров’я та якість матки безпосередньо впливають на продуктивність колонії. Ефективне управління матками дозволяє підвищити врожай меду:

Штучне вирощування маток: Вирощування маток з високопродуктивних колоній дає бджолярам більше контролю над появою нових маток та розщепленням колонії, що забезпечує сильні та продуктивні вулики.

Моніторинг продуктивності матки: Регулярна оцінка розплоду та життєздатності вулика допомагає визначити, коли матку слід замінити для підтримки стабільної яйцекладки та високої продуктивності.

3. Стратегічне управління ресурсами. Ефективне планування та управління ресурсами є ключовим для максимізації збору меду:

Стратегії годування: У періоди нестачі нектару забезпечення додаткового підживлення підтримує здоров'я та продуктивність бджіл, особливо ранньою весною та пізньою осінню.

Планування квіткових ресурсів: Заохочення посадки місцевих рослин або розташування вуликів у районах з багатим покриттям польових квітів допомагає забезпечити колонії достатньою кількістю нектару.

4. Впровадження технологічних рішень. Сучасні технології дозволяють підвищити ефективність виробництва меду та покращити управління вуликами:

Системи моніторингу вуликів: Розумні вулики з датчиками температури, вологості та розвитку розплоду надають бджолярам дані в режимі реального часу, що допомагає приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Автоматизовані медогонки: Використання сучасних автоматизованих медогонок скорочує час відкачування та забезпечує чистий збір меду, зберігаючи його якість та натуральні властивості.

Планомірне узгодження методів бджільництва з природним життєвим циклом колоній дозволяє ефективно збільшувати виробництво меду. Завдяки розумінню сезонної поведінки бджіл, вдосконаленому управлінню матками, оптимізації ресурсів та використанню сучасних технологій досягнення високих врожаїв стає реальністю. Ці методи не лише підвищують продуктивність окремих бджолярів, але й сприяють загальній стійкості виробництва меду як життєво важливої галузі сільського господарства.

6.11. Ефективне управління бджолиним середовищем та ресурсами

Для максимізації виробництва меду життєво важливо застосовувати стратегічний підхід, який включає правильний вибір бджіл, ефективне управління їхнім середовищем і ресурсами, а також інтеграцію сталих практик.

Нижче наведено ключові компоненти, що впливають на продуктивність бджільництва, та способи їх взаємодії.

1. Вибір відповідного виду бджіл. Першим кроком до досягнення високого рівня виробництва меду є підбір виду бджіл, найбільш пристосованого до місцевих умов. Різні породи мають унікальні характеристики, що впливають на продуктивність колонії. Найпоширенішим видом медоносних бджіл є Apis mellifera, відомий своєю адаптивністю та високою продуктивністю. До популярних порід належать:

Італійські бджоли: ніжні та продуктивні медоноси, відмінні збирачі нектару, ідеальні для комерційного бджільництва.

Крайські бджоли: швидко ростуть, активно збирають мед та добре адаптуються до різних умов середовища.

Російські бджоли: відзначаються високою стійкістю до хвороб і здатністю збирати нектар навіть у складних умовах, що забезпечує стабільний урожай.

Правильний вибір породи з урахуванням місцевого клімату та ресурсів є основою для продуктивного бджільництва.

2. Управління станом вулика. Створення оптимальних умов для колоній безпосередньо впливає на обсяг виробленого меду. Ефективне управління вуликами включає:

Суперування: додавання додаткових ящиків (суперів) під час пікового періоду цвітіння дозволяє бджолам збирати та зберігати більше меду.

Регулярні огляди вуликів: часті перевірки допомагають своєчасно виявляти хвороби, шкідників або нестачу простору, що підтримує здоров’я та продуктивність колонії.

3. Забезпечення рясних квіткових ресурсів. Наявність різноманітних рослинних ресурсів є критичною для високого врожаю меду:

Посадка рослин, сприятливих для запилювачів: створення різноманітних квітучих насаджень забезпечує колонії постійним джерелом нектару та пилку; Сезонне планування: врахування періодів цвітіння допомагає оптимально

розташувати вулики для забезпечення бджіл необхідними ресурсами у потрібний час.

Сталий підхід: впровадження органічного бджільництва та збереження середовища існування бджіл зміцнює екосистему та підвищує загальну продуктивність.

Органічні методи: відмова від синтетичних пестицидів і хімікатів підтримує здоров'я бджіл та покращує якість меду.

Збереження природного середовища: підтримка природних місць існування бджіл у навколишніх районах сприяє кращому доступу до їжі та підвищує продуктивність колоній.

Максимізація виробництва меду – це комплексний процес, що вимагає уваги до вибору породи бджіл, управління вуликами, забезпечення рясних квіткових ресурсів та сталого розвитку. Систематичне застосування цих методів дозволяє вирощувати здорові та продуктивні колонії, що забезпечує високий урожай меду та процвітання бджільництва. Поєднання цих практик із природним життєвим циклом бджіл закладає міцну основу для успішного та ефективного виробництва меду.

6.12. Сучасні методи виробництва меду

Ландшафт виробництва меду зазнав суттєвих змін завдяки впровадженню сучасних технологій та передових практик. Ці інноваційні методи підвищують ефективність роботи бджолярів, покращують здоров'я колоній та, як наслідок, збільшують врожайність меду. Розуміння сучасних технологічних підходів стає важливим для кожного, хто займається бджільництвом сьогодні.

1. Розумні вулики. Одним із ключових досягнень сучасного бджільництва є впровадження розумних вуликів. Такі високотехнологічні вулики оснащені датчиками та системами моніторингу, що дозволяють бджолярам:

Моніторинг стану вулика: датчики безперервно відстежують температуру, вологість та вагу, надаючи дані в режимі реального часу про стан колонії.

Зменшення кількості перевірок: автоматичні сповіщення повідомляють про потенційні проблеми, що дозволяє ефективно керувати більшою кількістю вуликів без зайвих оглядів.

Оптимізація управління вуликами: розширена аналітика допомагає приймати обґрунтовані рішення щодо ресурсів та втручань, необхідних для підтримки здоров'я бджіл.

Завдяки цим технологіям операції стають більш ефективними, а бджолярі отримують цінну інформацію про динаміку колоній.

2. Інноваційні рішення для підтримки температурного режиму: Thermosolar Hive. Сучасне бджільництво також впроваджує унікальні рішення для підтримки здоров'я колоній та підвищення продуктивності. Термосонячний вулик є яскравим прикладом таких інновацій:

Інтеграція сонячної панелі: вулик оснащено сонячною панеллю на даху, що підтримує оптимальну внутрішню температуру, сприяючи здоров'ю бджіл та знижуючи загрозу кліщів Варроа.

Покращене розширення колонії: термосонячне опалення стимулює ріст колонії та підвищує ефективність збору меду, що, за даними виробників, може збільшити продуктивність до 75%.

Такі технології допомагають бджолярам контролювати зовнішні фактори, що впливають на здоров'я бджіл, і оптимізувати виробництво меду.

3. Автоматизація процесу збору меду. Автоматизація радикально змінила традиційні методи екстракції меду, роблячи процес швидшим, ефективнішим та гігієнічнішим:

Автоматизовані медогонки: сучасні медогонки дозволяють швидко добувати мед без ризику його забруднення, скорочуючи час і зусилля порівняно з ручними методами;

Підвищення ефективності: автоматизація забезпечує більшу врожайність меду та покращує його якість завдяки мінімізації контактів і забруднень.

4. Підходи, засновані на даних. Аналітика даних стала невід'ємною частиною сучасного бджільництва, забезпечуючи обґрунтоване управління колоніями:

Прогнозна аналітика: використання історичних даних дозволяє передбачати рівень виробництва, виявляти потенційні проблеми та планувати ефективні стратегії управління.

Розподіл ресурсів: аналіз даних допомагає приймати рішення щодо графіків підгодівлі, розташування вуликів та інших ресурсів, що впливають на врожай меду.

Сучасне виробництво меду ґрунтується на поєднанні технологій, автоматизації та прийнятті рішень на основі даних. Завдяки розумним вуликам, інноваційним рішенням на кшталт термосонячного вулика та автоматизованим медогонкам бджолярі отримують можливість більш ефективно керувати своєю діяльністю та підвищувати продуктивність. Оскільки роль медоносних бджіл у нашій екосистемі продовжує зростати, впровадження таких сучасних методів стане ключовим чинником сталого та успішного розвитку бджільництва.

6.13. Вплив зміни клімату на бджільництво

Зміна клімату є реальною загрозою для всіх секторів сільського господарства, і бджільництво не є винятком. Виробництво меду — делікатний процес, що залежить від певних екологічних умов, дедалі більше постраждало через кліматичні коливання. Для бджолярів ці зміни становлять виклик не лише з точки зору кількості продукції, а й її якості та довгострокової стійкості. Саме тому критично важливо розуміти, як зміна клімату впливає на бджільництво, і які інновації з'являються для вирішення цих проблем. Від технологічних рішень до генетичної селекції — сектор бджільництва активно адаптується до мінливих умов.

Одним із найпряміших наслідків зміни клімату для бджільництва є зменшення різноманітності та чисельності рослин, необхідних бджолам для отримання нектару та пилку. У регіонах із непередбачуваними дощовими або

сухими сезонами доступність цих рослин знижується, що негативно впливає на розвиток колоній і, зрештою, на виробництво меду. Дослідження в Європі показали, що в таких країнах, як Іспанія та Італія, кліматична мінливість зменшила цвітіння ключових для бджіл рослин на 15%, що призвело до зменшення збору меду в середньому на 25% за останні роки.

Впровадження технологій для адаптації до кліматичних змін. Сучасні технології стали вирішальним інструментом для пом'якшення негативних наслідків зміни клімату. Використання датчиків, які в режимі реального часу контролюють температуру, вологість та активність у вуликах, змінило підхід бджолярів до управління колоніями. Такі технології дозволяють:

- ✓ своєчасно виявляти проблеми до того, як вони стануть критичними;
- ✓ оцінювати вплив кліматичних змін на здоров'я бджіл та розвиток колоній;
- ✓ приймати обґрунтовані рішення щодо профілактики хвороб та оптимізації середовища вуликів.

Приклади успішного впровадження технологій у різних країнах:

Ізраїль: країна зі спекотним та посушливим кліматом. Використання моніторингу в режимі реального часу покращило виживання бджіл влітку до 40%. Постійний контроль дозволяє виявляти ранні ознаки хвороб або зараження кліщем Варроа та вживати профілактичних заходів, перш ніж проблема поширюється на колонію.

Сполучені Штати Америки: вулики, обладнані датчиками, мали на 25% менше зараження кліщами. Це забезпечило підвищення продуктивності меду на 20% порівняно з неконтрольованими вуликами.

Франція: впровадження систем моніторингу дозволило зменшити втрати вуликів під час літньої спеки на 30%, що суттєво підвищило стабільність виробництва меду.

Генетичні та біологічні рішення. Наука також працює над біологічними методами адаптації бджіл до зміни клімату. Генетичний відбір спрямований на створення бджіл, стійких до хвороб та екстремальних температур.

Канада та Австралія: дослідники розробляють бджіл, здатних витримувати вищі температури без шкоди для здоров'я та продуктивності. Особливу увагу приділяють стійкості до кліща Варроа — однієї з головних загроз бджільництву. Попередні результати показують, що такі бджоли можуть підвищити продуктивність до 40% в умовах екстремальної погоди.

Вплив на біорізноманіття та стійкі практики. Зміна клімату впливає не лише на бджіл, а й на загальне біорізноманіття — ключовий компонент здоров'я вуликів. Впровадження сталих та регенеративних практик допомагає зберегти природні екосистеми:

- ✓ ротація вуликів;
- ✓ використання місцевих квітів на плантаціях;
- ✓ відновлення лісів у прилеглих районах.

Приклади впровадження сталих практик у різних країнах:

Мексика: застосування ротації вуликів та відновлення лісів дозволило деяким бджолярам збільшити виробництво меду на 20% та зменшити втрати під час посухи.

Канада: переміщення вуликів між зонами забезпечує регенерацію флори, зменшує ерозію ґрунту та покращує виробництво меду на 15%.

Аргентина та Чилі: посадка місцевих та кліматично стійких рослин навколо вуликів підвищила виробництво меду на 20% та зменшила втрати вуликів під час посухи на 30%.

Іспанія: відновлення лісів місцевими видами покращило доступність нектару та пилку, підвищивши виробництво меду на 25%.

Ці приклади демонструють, що поєднання технологій і сталих практик дозволяє бджолярству ефективно протистояти кліматичним змінам та одночасно підтримувати біорізноманіття.

Створення мережі розумних вуликів. Для збору та аналізу даних про поведінку бджіл у різних кліматичних умовах створено мережу енергонезалежних розумних вуликів AmoHive. Вулики мають стандартизовану

конструкцію та датчики, що забезпечують стабільну передачу даних щодня протягом усього року.

База даних фіксує широкий спектр показників, таких як: роїння; грабунок; успішна зимівля; весняний розвиток; розвиток зародка; захворювання та синдром руйнування колонії.

Ця база постійно оновлюється, забезпечуючи високу актуальність і точність інформації, що дозволяє бджолярам приймати обґрунтовані рішення щодо управління колоніями у мінливому кліматі.



Рис. 29. Розумна пасіка (Україна) [29]

Завдяки поєднанню технологій, генетичного покращення та сталих практик бджільництво адаптується та залишається стійким сектором. Адаптація до зміни клімату вже не є варіантом — це необхідність, що визначатиме розвиток галузі в найближчі десятиліття, забезпечуючи майбутнє виробництва меду та здоров'я екосистем.

Технологія SmartHive представляє собою унікальне поєднання передових технологічних рішень та сервісів, спрямованих на збереження та підтримку біорізноманіття. Це перша в своєму роді розробка на світовому ринку, яка інтегрує інноваційні цифрові підходи з екологічними ініціативами, забезпечуючи ефективний моніторинг, управління та підтримку екосистем у

різних умовах. SmartHive відкриває нові можливості для сталого розвитку, поєднуючи науку, технології та природоохоронні практики в одному комплексному рішенні.



Рис. 30. Розумний вулик SmartHive США [30]

Технологія SmartHive – це унікальне поєднання передових технологій та сервісів для підтримки біорізноманіття. Вона є першою у своєму роді на світовому ринку і забезпечує комплексний підхід до моніторингу та управління екосистемами бджолиних сімей.

SmartHive складається з кількох взаємопов'язаних компонентів, які працюють разом для збору та аналізу даних:

Основа – технологічний модуль, розташований під дерев'яним вуликом, що включає кілька компонентів для збору ключових показників стану вулика та активності бджіл.

Датчики – у кожному вулику встановлено ряд сенсорів для вимірювання акустики, вологості, ваги, температури та інших параметрів, що дозволяє отримувати повну картину стану колонії.

Камера – встановлена на передньому вході вулика для запису активності бджіл у режимі реального часу, що забезпечує візуальний моніторинг поведінки та здоров'я сім'ї.

Віддалений центр – локальний центр збору даних, який підключається до програмного забезпечення через Wi-Fi, забезпечуючи дистанційний контроль, аналіз та обробку отриманої інформації.

Такий інтегрований підхід дозволяє не лише відстежувати стан бджолосімей у реальному часі, а й приймати своєчасні управлінські рішення для збереження та підтримки біорізноманіття.

Інноваційні технології у виробництві меду відкривають нові можливості для підвищення ефективності бджільництва та збереження біорізноманіття. Використання смарт-систем, сенсорів, автоматизованих вуликів та цифрового моніторингу дозволяє в реальному часі відстежувати стан бджолосімей, рівень вологості, температуру, активність бджіл та якість продукту. Це не лише підвищує продуктивність та якість меду, але й зменшує ризики втрати бджолосімей через хвороби чи несприятливі умови.

Крім того, сучасні технології інтегрують елементи сталого розвитку: вони підтримують природні процеси, мінімізують втручання людини та сприяють охороні довкілля. Завдяки цифровій аналітиці та автоматизації процесів, бджолярі отримують можливість оптимізувати управління вуликами, прогнозувати врожаї та оперативно реагувати на будь-які зміни в стані колонії.

Отже, інноваційні технології перетворюють традиційне бджільництво на високотехнологічну сферу, де поєднуються екологічна відповідальність, ефективність та висока якість продукції. Вони закладають основу для сталого розвитку галузі та забезпечують конкурентні переваги на сучасному ринку меду.

6.14. Мед в харчовій галузі, його роль та значення

Мед є унікальним природним продуктом, який люди використовують тисячоліттями як джерело поживних речовин, лікувальних властивостей і гастрономічного задоволення. Він утворюється внаслідок діяльності бджіл із

нектару рослин, і його склад залежить від ботанічного походження, кліматичних умов, регіону та способу збору. До основних компонентів меду належать моносахариди (глюкоза та фруктоза), дисахариди, вітаміни (групи B, C, E), мінерали (калій, магній, залізо, цинк), ферменти, амінокислоти та антиоксиданти. Саме цей комплекс біологічно активних речовин забезпечує меду високу харчову цінність, корисні властивості та широкий спектр застосування в харчовій промисловості.



Рис. 31. Асортимент меду [31]

У харчовій промисловості мед виконує кілька ключових функцій:

Природний підсолоджувач та смаковий компонент – мед додає продуктам природну солодкість із характерним ароматом та багатогранним смаковим профілем. Його використовують у кондитерських виробах, хлібобулочних продуктах, десертах, морозиві, напоях, йогуртах, соусах та маринадах. Використання меду дозволяє зменшити кількість рафінованого цукру, що відповідає сучасним тенденціям здорового харчування.

Функціональна складова – мед містить численні біологічно активні компоненти, які сприяють зміцненню імунітету, покращенню травлення, загальному зміцненню організму та підвищенню життєвої енергії. Він активно використовується у виробництві функціональних продуктів, дієтичних добавок та продуктів для спортсменів, що потребують підвищеної енергетичної цінності та підтримки здоров'я.

Природний консервант та антимікробний агент – завдяки наявності ферментів, органічних кислот та антиоксидантів мед володіє антибактеріальними та протигрибковими властивостями. Це дозволяє використовувати його як природний консервант у харчових продуктах, зменшуючи потребу у штучних хімічних добавках і продовжуючи термін їхнього зберігання.

Інноваційний та креативний інгредієнт – мед відкриває широкі можливості для створення нових гастрономічних продуктів, таких як медові суміші, маринади, соуси, енергетичні батончики, медові напої та коктейлі. Його багатий аромат та смаковий спектр дозволяють поєднувати мед з різними продуктами, створюючи унікальні кулінарні комбінації та інноваційні рецептури.

Сировина для виробництва похідних продуктів – мед є основою для створення медових паст, концентратів, цукру, прополісу та інших бджолопродуктів, які використовуються як у харчовій, так і в фармацевтичній та косметичній промисловості.

Екологічна та економічна цінність – мед є продуктом, тісно пов'язаним із природними екосистемами та біорізноманіттям. Його виробництво стимулює збереження бджіл, рослинного покриву та забезпечує сталий розвиток сільського господарства, що важливо для підтримки екологічної рівноваги.

Роль у розвитку сучасної харчової промисловості – інноваційні технології збору, обробки та контролю якості меду дозволяють підвищити продуктивність, зберегти корисні властивості та гарантувати безпечність продукту. Це сприяє впровадженню меду у виробництво продуктів

функціонального харчування, органічних та преміальних лінійок, підвищуючи конкурентоспроможність виробників на сучасному ринку.

Отже, мед поєднує харчову цінність, лікувальні та функціональні властивості, а також технологічні можливості, що робить його незамінним компонентом у сучасній харчовій промисловості. Він сприяє розвитку інноваційних продуктів, підтримці екологічного балансу та відповідає сучасним трендам здорового та натурального харчування.

6.15. Сучасні технології переробки меду

Переробка меду у сучасній харчовій промисловості спрямована на збереження його природних властивостей, покращення якості, подовження терміну зберігання та розширення сфер застосування. Використання інноваційних методів дозволяє отримувати продукт, який зберігає харчову цінність, біологічно активні компоненти та натуральний аромат.

Фільтрація та очищення меду. Одним із ключових етапів обробки є видалення механічних домішок – воску, пилку, дрібних часточок кори та інших фракцій. Сучасні вакуумні та ультрафільтраційні системи дозволяють очищати мед без перегріву, зберігаючи його природні ферменти, вітаміни та аромат. Особливо ефективні керамічні мембрани та системи тонкого фільтрування, які забезпечують прозорість і стабільність меду.

Пастеризація та контроль температури. Для знищення дріжджів та бактерій мед піддають пастеризації, при цьому сучасні технології низькотемпературної обробки (40–60 °C) дозволяють уникнути руйнування корисних ферментів. Інфрачервона та ультразвукова обробка стають дедалі популярнішими, оскільки вони забезпечують стерилізацію меду без високого нагріву, зберігаючи його біологічну активність та природний смак.

Ультразвукова обробка та дегазація. Ультразвукові хвилі використовуються для руйнування газових бульбашок та запобігання неконтрольованій кристалізації меду. Така технологія дозволяє зберегти

структуру продукту, покращити його в'язкість і зовнішній вигляд, а також підвищити однорідність текстури при фасуванні.

Контроль кристалізації: кремування та кондиціонування. Кристалізація є природним процесом для багатьох видів меду. Сучасні системи кремування та промислові міксери дозволяють отримати однорідний «кремовий мед» із стабільною консистенцією, який легко наноситься і приємний на смак. Температурний контроль та обертання меду у спеціальних резервуарах дозволяють керувати процесом кристалізації.

Вакуумна дегідратація та концентрування. Для виготовлення медових сиропів та концентратів застосовують вакуумні дегідратори, які зменшують вміст води без руйнування корисних компонентів. Це дозволяє отримати густіший продукт, що легко зберігається та використовується як інгредієнт у кондитерських виробах, напоях та функціональних продуктах.

Мембранні та холодні технології обробки. Сучасні мембранні системи дозволяють розділяти компоненти меду, видаляючи пилок або отримуючи окремі фракції без термічного впливу. Холодне пресування забезпечує максимальне збереження біологічно активних речовин і ароматичних компонентів, що особливо важливо для високоякісних та органічних медів.

Автоматизація та цифровий контроль. Інноваційні технології включають автоматизовані системи контролю температури, вологості, густини та вмісту води. Використання сенсорів та програмного забезпечення дозволяє відстежувати якість меду на всіх етапах виробництва та забезпечує стандартизований продукт. Системи на кшталт SmartHive дозволяють інтегрувати моніторинг вуликів із процесами переробки меду, що підвищує ефективність і точність виробництва.

Інноваційні методи фасування та упаковки. Сучасна промисловість застосовує безконтактні системи розливу, вакуумну та герметичну упаковку. Використання бар'єрних матеріалів захищає мед від окислення та поглинання вологи, зберігаючи його свіжість і смакові якості протягом тривалого часу. Такі

технології також дозволяють створювати естетично привабливу продукцію для преміальних лінійок.

Сучасні технології переробки меду поєднують традиційні методи обробки з інноваційними цифровими та фізико-хімічними підходами. Вони дозволяють зберігати природні властивості продукту, підвищувати його якість, контроль за безпекою та ефективність виробництва. Інновації у цій сфері сприяють розвитку високоякісних продуктів, функціонального харчування та сталого бджільництва.

Питання для самоконтролю

1. Як класифікують мед за видами та характеристиками?

2. Що таке сирий (необроблений) мед?

3. Що розуміють під монофлерним медом?

4. Що таке отруйний або «п'яний» мед і в чому його особливості?

5. Що представляє собою поліфлерний мед?

6. Які існують різновиди сирого меду?

7. Яку роль відіграють медоносні бджоли в екосистемі?

8. Що таке розумні (смарт) вулики і як вони працюють?

9. З якою метою використовують автоматизовані медогонки?

10. У чому суть інноваційних методів точного запилення рослин?

11. На яких принципах здійснюється моніторинг стану вуликів?

12. Що передбачає концепція сталого розвитку виробництва меду?

13. Які методи управління дозволяють максимізувати виробництво меду?

14. Як на практиці організовується підвищення врожайності меду?

15. Які характерні ознаки відрізняють різні види медоносних бджіл?

16. Як забезпечується наявність рясних квіткових ресурсів для бджіл?

17. Як зміни клімату впливають на процеси бджільництва та виробництво меду?

18. Яке значення має мед в харчуванні людини?

19. Які сучасні технології переробки меду знайшли застосування в промисловості?

20. Які небезпеки може нести мед для споживачів?

Рекомендована навчальна література

1. Броварський В. Д. Промислове бджільництво : навч. посіб. / В. Д. Броварський, В. О. Папченко, Л. І. Адамчук. Київ : НУБіП України, 2017. 240 с.
2. Технологія переробки продуктів бджільництва : навч. посіб. / за ред. О. І. Лісогурської. Житомир : ЖНАЕУ, 2018. 198 с.
3. Технологія виробництва продукції бджільництва / Разанов С.Ф., Безпалий І.Ф., Бала В.І., Донченко Т.А. К.: Аграрна освіта, 2010. 277 с.
4. Товарна експертиза харчових продуктів : навч. посіб. / В. А. Сирохман, Т. М. Лозова. Київ : Центр навч. л-ри, 2016. 350 с.
5. Ситник Н. В. Хімія харчових продуктів : навч. посіб. / Н. В. Ситник. Київ : Кондор, 2017. 320 с.
6. Харчові технології : підручник : у 2 т. Т. 2 / за ред. А. І. Українця. Київ : НУХТ, 2017. 611 с.
7. Тіхосова Г. А. Митний контроль та експертиза товарів : навч. посіб. / Г. А. Тіхосова, О. М. Вербицький, Є. О. Калінський. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2019. 312 с.
8. Honey Analysis: New Advances and Challenges / ed. by V. de Alencar Arnaut de Toledo. London : IntechOpen, 2017. 250 p.

Розділ 7. ПІДСОЛОЖУВАЧІ

7.1. Використання підсолоджувачів у харчовій промисловості

У цьому розділі розглядаються цукри та підсолоджувачі, що використовуються в харчовій промисловості, а також сучасні можливості заміни доданого цукру. На сьогодні цукор є одним із основних факторів, що сприяють розвитку ожиріння та діабету. Це пов'язано зі значним збільшенням споживання доданого цукру в процесі виробництва напоїв, молочних продуктів, десертів, печива, цукерок, джемів та інших оброблених харчових продуктів.

Надмірне додавання цукру в харчові продукти призводить до підвищеного споживання енергії, негативного впливу на стан зубів і карієсу, а також до зростання поширеності низки хронічних неінфекційних захворювань, зокрема надмірної ваги та ожиріння, метаболічного синдрому, цукрового діабету 2 типу та серцево-судинних захворювань. Ці проблеми стали важливим викликом для громадського здоров'я, що стимулює необхідність скорочення споживання доданого цукру та підвищення харчової цінності продуктів.

Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) розробила рекомендації щодо обмеження споживання цукру. Вони пропонують, щоб споживання цукру не перевищувало 10% від загальної добової енергії, а для досягнення оптимального ефекту для здоров'я цей показник бажано знизити до 5%. У рекомендаціях ВООЗ застосовується поняття «вільні цукри», яке включає моносахариди та дисахариди, що додаються виробниками, кухарями або споживачами до харчових продуктів та напоїв, а також натуральні цукри, присутні в меді, сиропах, фруктових соках та концентрованих фруктових соках. Вважається, що використання вільних цукрів є більш доцільним і зрозумілим для контролю споживання цукру порівняно з поняттям загального або доданого цукру.

Технологічну роль цукрів необхідно належним чином враховувати при розробці стратегій зменшення або заміщення цукру, оскільки вони відіграють

ключову роль у переробці харчових продуктів. Цукри впливають на сенсорні характеристики продуктів, їх текстуру, зовнішній вигляд та термін придатності. Тому модифікація або скорочення вмісту цукру є серйозним викликом для харчової промисловості, адже може впливати на ці важливі технологічні та органолептичні властивості продукту.

Цукор, будучи багатофункціональним інгредієнтом, має важливе значення в оброблених харчових продуктах. Він надає солодкий смак і характерні відчуття у роті як твердим продуктам, так і напоям, сприяє формуванню текстури та бере участь у реакції Майяра, яка забезпечує утворення коричневої скоринки та характерного аромату.

Крім того, цукор знижує активність води у твердих продуктах, впливає на температуру замерзання, діє як наповнювач і природний консервант, подовжуючи термін придатності та забезпечуючи легкість структури продукту. Незважаючи на численні технологічні функції, найбільш значущою є його здатність надавати продуктам солодкий смак.

Тому при заміні цукру в харчових продуктах важливо забезпечити збереження смакових якостей, текстури та терміну придатності, щоб продукт залишався подібним до оригіналу за органолептичними та технологічними властивостями.

Сахароза вважається еталонним цукром для визначення солодкості та використовується як порівняльний стандарт при оцінці сенсорних і технологічних властивостей потенційних альтернативних підсолоджувачів. Вона виступає як утримувач вологи, що сприяє продовженню терміну придатності продуктів.

Крім того, сахароза значною мірою впливає на структуру, зовнішній вигляд і текстуру різних харчових продуктів, таких як хлібобулочні вироби та шоколад, завдяки своїм гігроскопічним та здатності до кристалізації властивостям.

Гігроскопічні властивості сахарози відіграють важливу роль у формуванні ніжної текстури, підвищеній пористості та збільшенні об’єму випічки.

Одночасно процес кристалізації сахарози сприяє утворенню хрусткої текстури та характерної скоринки у печиві та тістечках. Різні дослідники підтвердили, що цукор значно впливає на сенсорні та фізичні властивості кондитерських виробів, зокрема тортів і виробів, схожих на тортові десерти.

Цукор також відіграє ключову роль у зв'язуванні вологи, причому вміст вологи залежить від типу цукру. Наприклад, рідкий цукор містить більше вологи, ніж коричневий цукор, а коричневий цукор, у свою чергу, має вищий вміст вологи порівняно з кристалічним білим цукром.

У напоях цукор виконує багатогранну функцію: він забезпечує солодкість, покращує смак і смакові якості, підвищує в'язкість, впливає на текстуру та колір продукту. Крім того, цукор діє як природний консервант, знижуючи активність води і, відповідно, подовжуючи термін придатності продуктів.

Фізичні властивості сахарози регулюють ключові процеси, що впливають на текстуру харчових продуктів, зокрема реологічні характеристики, фазові переходи біополімерів та розподіл води між різними фазами продукту, а також пов'язані з цим сенсорні властивості. Дослідження показали, що функціональна роль цукру у поєднанні з його властивостями як пластифікатора та зволожувача істотно впливає на реологію печива. Ці аспекти можна стратегічно використовувати для модифікації рецептури, щоб зберегти характеристики продуктів, максимально наближених до оригінальних аналогів.

Водночас важливо усвідомлювати, що будь-яке зменшення, виключення або заміна сахарози в харчових продуктах може призвести до небажаних змін у якості та безпеці продукту. Зменшення вмісту доданого цукру до рівнів, які не впливають на органолептичні та технологічні властивості кінцевого продукту, залишається серйозним викликом для харчової промисловості.

У цьому розділі розглядаються цукри та підсолоджувачі, що застосовуються у виробництві харчових продуктів, а також сучасні можливості заміни доданого цукру. Такий підхід спрямований на підтримку здорової харчової поведінки та залучення агропродовольчої промисловості до диверсифікації продовольчих систем у напрямку сталого виробництва.

7.2. Класифікація підсолоджувачів

Підсолоджувачі – це речовини, що надають продуктам солодкий смак і використовуються як альтернативи цукру. Вони широко застосовуються у харчовій промисловості для контролю калорійності, зниження вмісту доданого цукру та створення продуктів для людей із діабетом або ожирінням.

Підсолоджувачі можна класифікувати за кількома основними ознаками:

За походженням

Природні – отримуються з рослин або тваринних джерел. До них належать:

- ✓ Цукор (сахароза, фруктоза, глюкоза).
- ✓ Мед.
- ✓ Стевіо-глікозиди (зі стевії).
- ✓ Сорбіт, ксиліт, маніт (цукрові спирти, що природньо зустрічаються в фруктах).

Синтетичні (штучні) – отримані хімічним шляхом:

- ✓ Аспартам.
- ✓ Сахарин.
- ✓ Сукралоза.
- ✓ Ацесульфам К.

За калорійністю

Енергетичні (калорійні) – надають енергію організму, як і звичайний цукор, але можуть мати меншу калорійність:

- ✓ Сахароза, фруктоза, мальтит, сорбіт.
- ✓ Безкалорійні або низькокалорійні – майже не дають енергії: стевія, сахарин, сукралоза, аспартам.

За хімічною природою

Монозахариди та дисахариди – натуральні цукри (глюкоза, фруктоза, сахароза).

Поліоли (цукрові спирти) – сорбіт, маніт, ксиліт.

Інтенсивні штучні підсолоджувачі – аспартам, сукралоза, сахарин, ацесульфам К.

За технологічними властивостями

Технологічно активні – впливають на текстуру, колір, в'язкість, термін придатності продукту (сахароза, мальтит, ксиліт).

Інтенсивні – використовуються лише для додання солодкого смаку, не впливають на текстуру або об'єм продукту (аспаратам, сукралоза, стевія).

За призначенням

Для напоїв і десертів – підсолоджувачі з високою солодкістю та гарною розчинністю.

Для випічки та кондитерських виробів – підсолоджувачі, що витримують нагрівання і зберігають текстуру продукту.

Для діабетичних і дієтичних продуктів – низькокалорійні та безпечні для глюкози крові.

Натуральні підсолоджувачі – це солодкі сполуки, безпосередньо отримані з природних джерел і піддані відповідній обробці. Більшість із них є вторинними метаболітами рослин або мікроорганізмів. До натуральних підсолоджувачів належать різноманітні речовини, зокрема сахароза, цукрові спирти, терпеноїдні глікозиди та деякі поліфеноли. Хоча за солодкістю вони можуть поступатися штучним підсолоджувачам, натуральні сполуки зазвичай вважаються більш безпечними для споживання.

Термін «штучні підсолоджувачі» відноситься до замінників цукру або нецукрових підсолоджувачів, що синтетично отримані для використання у харчових продуктах. Ці речовини застосовуються як альтернатива цукру в різноманітних продуктах харчування. Більшість штучних підсолоджувачів характеризуються високою солодкістю та низькою калорійністю, що робить їх привабливими як для виробників, так і для споживачів. Шість із цих підсолоджувачів були офіційно схвалені Управлінням з контролю за продуктами і ліками США (FDA) як харчові добавки: аспартам, неотам, сахарин, ацесульфам калію (Ace-K), сукралоза та адвантам.

7.2.1. Класифікація за солодкістю

Підсолоджувачі можна класифікувати залежно від їхньої здатності надавати солодкий смак у порівнянні з сахарозою (яка приймається за стандарт із солодкістю 1).

Таблиця 10 – Класифікація підсолоджувачів

Група за солодкістю	Підсолоджувач	Солодкість порівняно з сахарозою	Калорійність	Основні сфери застосування
Слабко солодкі	Сорбіт	0,6–0,7×	2,6 ккал/г	Десерти, випічка, жувальні гумки
	Маніт	0,7–0,9×	1,6 ккал/г	Дієтичні кондитерські вироби, жувальні гумки
Помірно солодкі	Фруктоза	1,2–1,8×	4 ккал/г	Медові суміші, десерти, напої
	Мальтит	0,7–0,9×	2,1 ккал/г	Дієтичні кондитерські вироби, шоколад
Інтенсивно солодкі	Аспартам	~200×	4 ккал/г (в дуже малих дозах практично безкалорійний)	Безкалорійні напої, десерти, жувальні гумки
	Сукралоза	~600×	0 ккал/г	Напої, десерти, кондитерські вироби, випічка
	Стевіо-глікозиди	100–300×	0 ккал/г	Безкалорійні продукти, напої, діабетичні продукти
	Сахарин	300–500×	0 ккал/г	Напої, кондитерські вироби, дієтичні продукти
	Ацесульфам К (Ace-K)	200×	0 ккал/г	Напої, десерти, кондитерські вироби
	Адвантам	~20 000×	0 ккал/г	Спеціальні харчові продукти, безкалорійні підсолоджувачі

Солодкість підсолоджувачів визначається не лише хімічною природою, але й умовами застосування: температурою, pH, складом продукту та взаємодією з іншими компонентами.

Підсолоджувачі суттєво різняться за солодкістю та впливом на продукт. Залежно від рівня солодкості порівняно з сахарозою, їх можна розділити на два основні типи: підсолоджувачі з низькою солодкістю та підсолоджувачі з високою солодкістю.

Підсолоджувачі з низькою солодкістю мають солодкість, що приблизно дорівнює або трохи нижча за сахарозу. Вони зазвичай використовуються для покращення об'єму, смакових характеристик і збереження харчових продуктів. До цієї групи належать цукрові спирти, такі як мальтит, сорбіт, лактит, ксиліт, еритритол та маніт. Їх додають у хлібобулочні вироби, сніданки, мариновані продукти та інші продукти, щоб підвищити привабливість для споживачів і забезпечити бажану текстуру та вологість.

Підсолоджувачі з високою солодкістю значно перевищують солодкість сахарози і характеризуються особливим ефектом: для досягнення необхідного рівня солодкості достатньо дуже невеликої кількості. Завдяки цьому їх внесок в енергетичну цінність продукту мінімальний. До цієї групи належать такі підсолоджувачі, як сахарин, аспартам, сукралоза та інші інтенсивні замінники цукру. Вони широко використовуються у харчовій промисловості, зокрема у виробництві безцукрових газованих і негазованих напоїв, дієтичних десертів та низькокалорійних продуктів.

7.2.2. Класифікація за харчовою цінністю

Підсолоджувачі можна класифікувати залежно від їхнього внеску в енергетичну цінність харчових продуктів.

Енергетичні (калорійні) підсолоджувачі дають організму енергію, подібно до звичайного цукру, хоча зазвичай мають трохи нижчу калорійність. До цієї групи належать сахароза, фруктоза, мальтит, сорбіт, ксиліт та маніт. Вони широко застосовуються в десертах, хлібобулочних виробах, кондитерських виробах та напоях. Крім надання солодкого смаку, такі підсолоджувачі впливають на текстуру, колір і термін придатності продукту, а також підтримують вологість і об'єм.

Низькокалорійні підсолоджувачі забезпечують організм лише частиною енергії, значно меншою за сахарозу. Прикладами є еритритол (0,2 ккал/г), мальтит (2–2,1 ккал/г) та сорбіт (2,6 ккал/г). Вони використовуються у дієтичних та безцукрових продуктах, жувальних гумках і десертах з обмеженою калорійністю. Основна перевага цих підсолоджувачів полягає у зниженні калорійності продукту без значної втрати смакових та текстурних характеристик.

Безкалорійні або інтенсивні підсолоджувачі мають практично нульову калорійність і в десятки чи сотні разів перевищують солодкість сахарози. До цієї групи належать аспартам (~200×), сукралоза (~600×), стевіо-глікозиди (100–300×), сахарин (300–500×), ацесульфам К (200×) та адвантам (~20 000×). Вони широко застосовуються у безкалорійних напоях, дієтичних десертах та продуктах для людей з діабетом або тих, хто контролює вагу. Ці підсолоджувачі додаються у дуже малих кількостях і зазвичай не впливають на текстуру, об’єм чи колір продукту, але забезпечують потрібний рівень солодкості.

Харчова цінність підсолоджувачів визначає їхнє застосування у продуктах, спрямованих на зменшення калорійності, контроль ваги, регулювання глікемічного індексу або задоволення спеціальних дієтичних потреб споживачів.

Підсолоджувачі можна поділити на харчові підсолоджувачі (ХП) та нехарчові підсолоджувачі (НП) залежно від їхнього складу та впливу на організм.

Натуральні підсолоджувачі здатні забезпечувати організм енергією та брати участь у метаболічних процесах. У зв’язку з урбанізацією та зростанням доступності напоїв, світовий попит на натуральні підсолоджувачі різко зріс. До найпоширеніших натуральних речовин, що застосовуються у харчових продуктах і напоях, належать глюкоза, фруктоза та сахароза. Однак шкідливий вплив надмірного споживання цих цукрів на здоров’я – особливо ризики ожиріння, діабету 2 типу та серцево-судинних захворювань – обговорюється вже давно.

Підсолоджувачі з низькою калорійністю або низьким вмістом солодкості, відомі також як некалорійні підсолоджувачі, забезпечують солодкий смак із

мінімальним енергетичним внеском у раціон (зазвичай незначним при типових дозах споживання). Деякі з них додатково покращують сенсорні характеристики продуктів. Більшість інтенсивних замінників цукру у сотні–тисячі разів солодші за традиційний цукор. До найбільш поширених на ринку належать ацесульфам К (Ace-K), неотам, сахарин та стевія, які широко використовуються у продуктах категорії «без цукру».

З 1980-х років застосування нехарчових підсолоджувачів та низькокалорійних вуглеводів (наприклад, пребіотичних волокон) стало популярним способом зменшення негативного впливу надмірного споживання цукру – таких як ожиріння, діабет 2 типу та серцево-судинні захворювання – при збереженні солодкості продуктів. Відкриття та впровадження підсолоджувачів стало ключовим етапом інновацій у харчових технологіях, дозволивши виробляти солодкі продукти з низьким або нульовим калорійним внеском.

Щоб уникнути небажаних наслідків від зменшення або виключення цукру, важливо визначити оптимальний мінімальний рівень цукру та/або підібрати ефективні замінники, які дозволяють зберегти основні функції та якість кінцевого продукту.

Для часткової або повної заміни сахарози у харчових продуктах використовуються поживні та неживильні підсолоджувачі, а також поліоли, низькокалорійні вуглеводи (наприклад, олігофруктоза, мальтодекстрин, полідекстроза) та різноманітні наповнювачі.

Серед найпоширеніших підсолоджувачів, що застосовуються в харчовій промисловості, – сукралоза, мальтит, стевіозид, сорбіт, ізомальт, аспартам, еритритол та інші. До наповнювачів належать інулін, мальтодекстрин, полідекстроза, олігофруктоза, сиропи та подібні речовини. Вибір конкретного підсолоджувача чи наповнювача має враховувати тип харчового продукту, законодавчі стандарти та уподобання споживачів.

Поживні підсолоджувачі зазвичай включають фруктозу, глюкозу, лактозу та поліоли. Вони забезпечують енергію та частково впливають на метаболічні процеси організму.

Неживильні підсолоджувачі можуть бути як натуральними – наприклад, стевія, тауматин або монах-фрукт, так і синтетичними – сахарин, аспартам, сукралоза тощо. Вони відзначаються високою солодкістю та приємним смаком, але містять мінімум калорій, що робить їх популярними у дієтичних, безцукрових та низькокалорійних продуктах.

Поліоли (зокрема еритритол, ізомальтитол, лактитол, мальтитол, сорбіт, маніт та ксиліт) є харчовими добавками з низькою калорійністю та високою підсолоджувальною здатністю. Завдяки цьому їх використовують у невеликих кількостях у харчових продуктах, що робить їх ефективними замінниками цукру. Поліоли не сприяють розвитку карієсу та не викликають значної глікемічної реакції, що дозволяє їх застосовувати у гіпокалорійних дієтах, продуктах для людей із діабетом та в інших випадках, коли необхідно контролювати калорійність споживаної їжі.

У сучасному виробництві зросла тенденція поєднувати нехарчові замінники цукру з цукровими спиртами для створення низькокалорійних хлібобулочних виробів. У такому поєднанні штучні підсолоджувачі, наприклад аспартам та сукралоза, забезпечують необхідну солодкість, тоді як цукрові спирти відповідають за об’єм і текстуру виробів.

В останні десятиліття використання синтетичних підсолоджувачів, таких як аспартам, сукралоза, цикламат, ацесульфам К та сахарин, стало поширеним у харчовій промисловості. Це пов’язано з їхньою високою солодкістю, низькою вартістю та відсутністю калорій, що робить їх ідеальними для виробництва низькокалорійних продуктів та напоїв.

У випадку напоїв зменшення вмісту сахарози та її заміна штучними або натуральними підсолоджувачами може негативно вплинути на текстуру та сенсорні характеристики продукту. Зокрема, зниження в'язкості рідини може викликати відчуття сухості у роті та змінити смакові та часові профілі споживання. Щоб уникнути таких небажаних ефектів у низькокалорійних напоях, до складу додають вуглеводні загущувачі, харчові волокна та інші

функціональні добавки, які допомагають підтримувати потрібну текстуру та приємне сенсорне сприйняття.

Сукралоза є одним із найпоширеніших підсолоджувачів, що застосовуються у виробництві напоїв. Дослідження показали, що аспартам зберігає стабільність у кислих середовищах, але є нестійким до високих температур та лужних умов. Сукралоза швидко досягає максимальної солодкості, проте може залишати небажаний післясмак, що іноді сприймається як залишкова солодкість.

У сучасних напоях повідомлялося про використання нових некалорійних синтетичних підсолоджувачів, таких як неотам, адвантам та алітам. Зокрема, неотам виявився ефективною альтернативою аспартаму завдяки високій підсолоджувальній здатності – у 7000–13 000 разів солодший за сахарозу. Було показано, що його можна використовувати для заміни до 30% цукру без негативного впливу на смакові властивості продукту.

При виборі підсолоджувача для напоїв важливо враховувати такі характеристики: розчинність, стабільність при різних значеннях pH, властивості солодкості, стійкість до температури обробки, часовий сенсорний профіль та наявність небажаних присмаків.

Хоча штучні підсолоджувачі забезпечують подібні смакові якості до натуральних цукрів, їхні шляхи метаболізму значно відрізняються. Наукові дослідження показують, що вони можуть впливати на метаболічні процеси, склад кишкової мікробіоти, рівень засвоєння та перетравлення. Вживання штучних підсолоджувачів може впливати на масу тіла та гомеостаз глюкози через фізіологічні механізми, включаючи взаємодію з кишковою мікробіотою, систему винагороди, процеси адипогенезу, секрецію інсуліну, абсорбцію глюкози в кишечнику та інсулінорезистентність.

Вважається, що заміна цукру підсолоджувачами без зменшення споживання дуже солодкої їжі не призводить до розвитку переваги менш солодких продуктів. Такий підхід може мати потенційно несприятливі наслідки для здоров’я. Активація рецепторів солодкого без одночасного споживання

енергії може призвести до метаболічної дисрегуляції, оскільки порушується природний зв'язок між смаком солодкого та енергетичним внеском продукту. Це, у свою чергу, може сприяти розвитку порушень толерантності до глюкози та інших метаболічних порушень.

Отже, реакція організму на споживання вуглеводів значною мірою залежить від узгодження між смаковими відчуттями та фактичним енергетичним внеском продукту.

Врахування можливих наслідків та занепокоєння споживачів щодо використання штучних підсолоджувачів є важливим фактором при розробці стратегій заміни або зменшення цукру у продуктах, поряд із іншими підходами до зниження його вмісту.

Натуральні підсолоджувачі набувають дедалі більшого поширення в напоєвій промисловості через попит на продукти з чистим етикетуванням. Одним із таких підсолоджувачів є стевія, яка використовується у низькокалорійних напоях завдяки приємним органолептичним властивостям. Водночас вона може залишати гіркоту, смак лакриці та післясмак. Щоб пом'якшити ці недоліки, рецептури напоїв часто доповнюють наповнювачами та ароматизаторами, які покращують смакові властивості продукту.

Ще одним перспективним натуральним підсолоджувачем є могрозид – природна сполука з класу глікозидів, яка складається з тритерпеноїдних сапонінів куркурбітанового типу. Він характеризується помірною піковою солодкістю, тривалішою солодкістю у післясмаку та специфічними присмаками (гірким, хімічним або металевим), що слід враховувати при використанні.

Цукрові спирти або поліоли також є ефективними замінниками сахарози, оскільки вони мінімально метаболізуються організмом. Наприклад, еритритол – некалорійний поліол – широко застосовується у безцукрових газованих напоях, забезпечуючи солодкість без значного енергетичного внеску.

Крім того, перспективними для використання у виробництві напоїв є інші цукри, такі як D-фруктоза та L-арабіноза, а також солодкі білки, наприклад міракулін, монелін, тауматин, мабінліни, пентадин, куркулін та браззеїн. Ці

натуральні сполуки можуть стати основою для створення продуктів із чистим етикетуванням та високою органолептичною якістю.

Натуральні цукри (нерафінований цукор) вважаються кращими, оскільки вони володіють високою харчовою цінністю завдяки наявності корисних компонентів – біоактивних сполук, мінералів, клітковини, антиоксидантів та фітохімічних речовин. Ці речовини пом'якшують негативний вплив рафінованого цукру на організм. Тому відмова від рафінованого цукру або хоча б зменшення його споживання має пропагуватися як здоровіша альтернатива у виборі продуктів харчування.

Натуральні підсолоджувачі, такі як мед, ксиліт, еритритол, мальтоза, мальтодекстрин, стевія, патока, кленовий сироп, кокосовий цукор, нектар агави та фініковий цукор, представляють важливу альтернативу цукру. Вони є більш привабливими для споживачів та відкривають комерційні можливості для харчової промисловості.

Натуральні підсолоджувачі включають традиційні підсолоджувачі, отримані з природних джерел. Їх виділяють з бджолиного продукту (наприклад, мед), рослинних або деревних соків (кленовий сироп, нектар агави), плодів (сироп ріжкового дерева), насіння та коренів (сироп якон), а також з листя (стевія). Вони споживаються у своїй природній матриці з мінімальною обробкою.

Основний склад цих підсолоджувачів включає сахарозу, фруктозу та глюкозу, що становить принаймні 50% у сиропах та меді рослинного походження. Крім того, вони містять невелику кількість поліолів та додаткових поживних речовин: білки (<1,4%), ліпіди (<0,5%), харчові волокна (<3%), фітохімічні сполуки та мінімальну кількість мінералів (<2%) і вітамінів (<0,02%), зокрема поліфенолів.

Натуральні підсолоджувачі надають позитивний вплив на здоров'я, зокрема покращують метаболічне здоров'я, запобігають набору зайвої ваги та знижують рівень глюкози в крові. Цей ефект пов'язаний із наявністю біомолекул, що мають поживні та корисні для здоров'я властивості, таких як вітаміни,

фітогормони та мінерали, які можуть модулювати фізіологічні процеси організму.

Деякі дослідження показують, що наявність фітохімічних сполук у традиційних підсолоджувачах, таких як мед та нектар агави, може сприяти зниженню глікемічної активності порівняно з глюкозними сиропами та сахарозою. Фенольні сполуки мають низку корисних властивостей, що потенційно впливають на здоров'я: зниження ризику серцево-судинних захворювань, запобігання нейродегенеративним станам та діабету 2 типу, а також проявляють антиоксидантні властивості.

Використання фруктів як компонентів замінників цукру дозволяє зменшити щоденне споживання цукру, оскільки вони природно солодкі. Дослідження показали, що фрукти є ефективними натуральними замінниками цукру. Наприклад, рецептуру темного шоколаду було адаптовано із застосуванням пальмового цукру та фініків як замінників сахарози, що добре сприймалося учасниками сенсорної панелі.

Змішування підсолоджувачів може стати ефективною стратегією для мінімізації негативних ефектів окремих підсолоджувачів та досягнення кращого результату. Відповідна комбінація підсолоджувачів забезпечує синергетичний ефект, покращуючи інтенсивність солодкості, стабільність та посилюючи смакові характеристики і часовий сенсорний профіль продукту. Наприклад, комбінація некалорійних підсолоджувачів (NNS), що відповідають за солодкість, з цукровими спиртами, які забезпечують об'єм, дозволяє отримати якісний низькокалорійний хлібобулочний виріб.

Ще однією інноваційною групою є позитивні алостеричні модулятори солодкості. Це сполуки, які самі по собі не мають солодкого смаку, але підсилюють солодкість підсолоджувачів завдяки синергетичному ефекту. Вони не активують рецептори солодкого самостійно, але сприяють кращому зв'язуванню підсолоджувача з рецептором. Використання таких модулюючих сполук разом із підсолоджувачами дозволяє зменшити кількість підсолоджувача, зберігаючи бажаний смак, і одночасно зменшити небажані присмаки, такі як

гіркота, металевий післясмак або тимчасові сенсорні дефекти, характерні для деяких некалорійних підсолоджувачів.

Запропоновано новий тип ароматизаторів – ароматизатори з модифікуючими властивостями, які виступають альтернативою неживильним підсолоджувачам. Вони здатні активувати смакові рецептори людини, підсилюючи солодкість, зменшуючи солоність та маскуючи гіркоту. Деякі з таких ароматизаторів взаємодіють безпосередньо із солодкими рецепторами, покращуючи сприйняття солодкого смаку.

Ці ароматизатори самостійно не мають вираженого солодкого чи солоного смаку, але вони модулюють смак або запах інших компонентів у продуктах, допомагаючи підтримувати або покращувати смаковий профіль як твердих, так і рідких продуктів. Використання ароматизаторів з модифікуючими властивостями дозволяє харчовій промисловості зменшити кількість цукру (сахарози, глюкози, фруктози), підсолоджувачів (наприклад, аспартаму) та солі (хлориду натрію), а також маскувати небажані присмаки, такі як гіркота (хлориду калію), стійкий післясмак підсолоджувачів (фракції стевії) або терпкість рослинних білків (соя, горох).

Окремі дослідження присвячені зменшенню розміру частинок цукру, що збільшує співвідношення поверхні до об’єму та підсилює відчуття солодкості без збільшення кількості цукру. Традиційні частинки мають розмір 20–100 мкм, а для отримання мікро- та наночастинок (350–500 нм) використовують розпилювальні або нанорозпилювальні сушарки.

Однак цей підхід ускладнюється через температуру склування сахарози, яка близька до 62 °C, що робить матеріал липким. Як альтернативу запропоновано додавання носіїв (наприклад, інулін, пектин, лецитин) до розчину перед розпилювальною сушкою. Це підвищує температуру склування та зменшує проблему липкості. На сьогодні таких досліджень небагато, і вони потребують подальшого вивчення для практичного впровадження в харчову промисловість.

Інкапсуляція підсолоджувачів використовується для покращення сприйняття альтернативних підсолоджувачів у харчових продуктах. Ця технологія дозволяє створювати спеціальні структури або матриці з контрольованим вивільненням солодощі, що зменшує надмірну інтенсивність смаку таких сполук, як ацесульфам-К, аспартам, тауматин або ксиліт. Інкапсуляція також покращує стабільність цих підсолоджувачів і їх сенсорні властивості у різних харчових продуктах.

Стратегія інкапсуляції базується на стимуляції смакових рецепторів, контролі розміру частинок та в'язкості продукту, що дозволяє оптимізувати сприйняття солодощі у твердих та рідких продуктах. Також цей метод дозволяє зменшувати вміст цукру, використовуючи оптимізоване стимулювання рецепторів солодкого смаку (метод гетерогенного розподілу), що сприяє більш ефективному вивільненню рідини, регулюванню розміру частинок та покращенню текстури продуктів.

Новий технологічний підхід до зниження вмісту цукру у кондитерських виробах ґрунтується на регулюванні розміру частинок цукру. Дослідження показали, що різні діапазони розмірів (924–1877 мкм, 627–1214 мкм, 459–972 мкм) значно впливають на фізичні та сенсорні властивості продуктів. Зокрема, дрібні частинки цукру (228–377 мкм та 459–972 мкм) збільшують сприйняту інтенсивність солодощі у шоколадних брауні та печиві, що робить цей підхід економічно ефективною та технологічно життєздатною стратегією для зменшення цукру у випічці.

Метод інкапсуляції забезпечує контрольоване вивільнення солодощі і маскує інтенсивний смак альтернативних підсолоджувачів. Повідомлялося про численні патенти, присвячені інкапсуляції підсолоджувачів і оцінці їх ефективності. Альтернативні підсолоджувачі, такі як ацесульфам-К, аспартам, тауматин і ксиліт, особливо добре підходять для цього підходу, оскільки інкапсуляція дозволяє значно покращити їх стабільність та сенсорні характеристики у харчових продуктах.

7.3. Харчові, нехарчові та традиційні підсолоджувачі

Харчові підсолоджувачі (живильні). Харчові підсолоджувачі забезпечують організм енергією та можуть брати участь у метаболічних процесах. Вони зазвичай отримуються з природних джерел, таких як цукор, мед або фруктові сиропи, і включають глюкозу, фруктозу, мальтозу, лактозу та різні цукрові спирти (поліоли), такі як сорбіт, мальтит, еритритол, ксиліт. Ці підсолоджувачі не лише надають солодкий смак, але й покращують об'єм, текстуру та стабільність продуктів, що робить їх особливо цінними у випічці та кондитерських виробах.

Нехарчові підсолоджувачі (нескладові, низькокалорійні). Нехарчові підсолоджувачі не забезпечують організм калоріями або роблять це в мінімальних кількостях, проте вони значно солодші за сахарозу. Вони можуть бути натуральними (стевія, тауматин, монах-фрукт) або синтетичними (сахарин, аспартам, ацесульфам-К, сукралоза). Ці підсолоджувачі широко використовуються у виробництві низькокалорійних продуктів і напоїв, оскільки забезпечують солодкість без значного внеску в енергетичну цінність. Вони особливо популярні серед людей, що дотримуються дієти, пацієнтів із діабетом та тих, хто контролює споживання калорій.

Традиційні (натуральні) підсолоджувачі. Традиційні підсолоджувачі отримують з природних джерел і споживаються у мінімально обробленому вигляді. До них належать: бджолиний мед, рослинні сиропи та нектари (кленовий сироп, нектар агави), плодові сиропи (сироп ріжкового дерева, фініковий сироп), сиропи з коренів та насіння (сироп якон), листя рослин (стевія).

Традиційні підсолоджувачі містять цукри (сахарозу, фруктозу, глюкозу), невелику кількість поліолів, білків, ліпідів, харчових волокон, мінералів та антиоксидантів, що робить їх більш поживними та корисними порівняно з рафінованим цукром. Вони можуть покращувати метаболічне здоров'я, знижувати глікемічний індекс та запобігати збільшенню ваги.

Як відомо, надмірне споживання цукру не лише сприяє накопиченню жиру в організмі, але й підвищує ризик розвитку різних захворювань, таких як діабет 2 типу та серцево-судинні патології. У зв'язку з цим, а також враховуючи зростаючий попит споживачів на здоровіші та натуральні продукти, протягом останніх десятиліть харчова промисловість активно зосередилася на пошуку замінників цукру у різних продуктах. Це дозволяє створювати продукти з покращеними властивостями для здоров'я, зберігаючи при цьому бажаний солодкий смак для споживачів.

На сьогодні штучні та нехарчові підсолоджувачі залишаються одними з найпоширеніших альтернатив цукру. Хоча вони вважаються низькокалорійними або безкалорійними, дослідження показують, що їхнє надмірне використання інколи може бути пов'язане з певними метаболічними ризиками, включаючи діабет 2 типу та серцево-судинні захворювання.

Тому зростає інтерес до натуральних альтернатив, що отримуються з природних джерел і здатні забезпечити солодкість без потенційного негативного впливу на здоров'я. Виходячи з цього, класифікацію підсолоджувачів доцільно здійснювати за двома критеріями: походження – синтетичні або натуральні; харчова цінність – калорійні (живильні) або безкалорійні (нехарчові).

Нижче наведено докладний опис основних підсолоджувачів та конкретних речовин, що застосовуються у харчовій промисловості у всьому світі.

7.4. Синтетичні підсолоджувачі

Синтетичні підсолоджувачі, або ***штучні замінники цукру***, – це синтетичні сполуки, які використовуються для заміни сахарози та інших цукрів у харчових продуктах і напоях. Вони застосовуються в солодощах, консервах, молочних продуктах, напоях та інших продуктах харчування.

Молекули штучних підсолоджувачів часто є похідними сульфа-, дипептидів або сахарози. Основна їхня перевага полягає у здатності забезпечувати солодкий смак без підвищення калорійності та рівня глюкози в крові. Завдяки високій підсолоджувальній здатності – від 30 до 13 000 разів

солодше за сахарозу – невелика кількість цих речовин забезпечує достатню солодкість продукту.

Штучні підсолоджувачі, або замінники цукру, – це синтетичні речовини, що застосовуються для заміни цукру у процесі підсолоджування різних продуктів, таких як солодощі, консерви, молочні продукти та напої. Молекули штучних підсолоджувачів зазвичай включають похідні сульфа-, дипептидів та сахарози.

Ці сполуки забезпечують солодкий смак без збільшення споживання калорій та не підвищують рівень цукру в крові. Завдяки високій підсолоджувальній здатності (у 30–13 000 разів перевищує солодкість сахарози) невелика кількість штучного підсолоджувача забезпечує достатню солодкість. Водночас необхідно контролювати споживання таких речовин для гарантування безпеки здоров'я споживачів. До найпоширеніших штучних підсолоджувачів належать аспартам, неотам, сахарин, ацесульфам-к, сукралоза та адвантам, які схвалені як харчові добавки Управлінням з контролю за продуктами харчування та лікарськими засобами США (FDA).

Синтетичні замінники цукру повинні мати смак, схожий на сахарозу, демонструвати безпечність, нетоксичність та не спричиняти карієс. Вони також не повинні впливати на рівень глюкози та інсуліну в крові. Однак деякі дослідження вказують, що некалорійні підсолоджувачі можуть створювати неоднозначні психобіологічні сигнали, які впливають на регуляцію апетиту та енергетичного балансу.

На сьогодні більшість підсолоджувачів на ринку є синтетичними сполуками, що проходять строгий процес оцінки безпеки міжнародними та національними органами, такими як:

- Спільний експертний комітет ФАО/ВООЗ з харчових добавок (JECFA);
- Управління з контролю за продуктами харчування та лікарськими засобами США (FDA);
- Європейське агентство з безпеки харчових продуктів (EFSA).

Ці органи не лише оцінюють безпеку сполук перед їх використанням, а й постійно переглядають нові дані щодо стабільності, безпеки, смаку та вартості підсолоджувачів.

Попри це, у останні роки споживачі віддають перевагу більш натуральним та здоровим продуктам, виготовленим сталим способом. Це стимулює виробників шукати натуральні та функціональні підсолоджувачі, які можна застосовувати в харчових продуктах без шкоди для смаку та безпечності.

Нижче наведені найпоширеніші синтетичні підсолоджувачі.

Аспартам (Е-951). Аспартам є одним із найвідоміших інтенсивних синтетичних підсолоджувачів, який широко застосовується у виробництві дієтичних напоїв, десертів, жувальних гумок та продуктів зі зниженою калорійністю. За хімічною природою він є метиловим ефіром дипептиду, що складається з фенілаланіну та аспарагінової кислоти. Його підсолоджувальна здатність приблизно у 180–200 разів перевищує солодкість сахарози, тому для досягнення необхідного смаку потрібні дуже малі кількості речовини. Аспартам частково метаболізується в організмі, але не спричиняє значного підвищення рівня глюкози в крові, що дозволяє використовувати його у продуктах для людей із цукровим діабетом. Водночас він нестійкий до високих температур і лужного середовища, тому не підходить для тривалої термічної обробки. Його споживання обмежується для осіб із фенілкетонурією через наявність фенілаланіну.

Неотам (Е-961). Неотам є похідним аспартаму нового покоління, створеним для підвищення солодкості та технологічної стабільності. Він у тисячі разів солодший за сахарозу (приблизно у 7 000–13 000 разів), що дозволяє використовувати його в надзвичайно малих концентраціях без суттєвого впливу на енергетичну цінність продукту. На відміну від аспартаму, неотам більш стійкий до нагрівання та змін pH, тому може застосовуватися у ширшому спектрі харчових технологій, включаючи випікання та пастеризацію. Він практично не метаболізується до фенілаланіну у значущих кількостях, тому не становить

ризику для людей із фенілкетонурією. Неотам також характеризується чистим солодким смаком без вираженого післясмаку.

Сахарин (Е-954). Сахарин — один із найстаріших штучних підсолоджувачів, що використовується понад століття. Його підсолоджувальна здатність у 300–400 разів перевищує солодкість цукру, а сам він не метаболізується в організмі та виводиться у незміненому вигляді. Завдяки високій термостійкості та стабільності в кислому середовищі сахарин широко застосовується у виробництві напоїв, консервованих продуктів, кондитерських виробів і столових підсолоджувачів. Недоліком є можливий гіркуватий або металевий післясмак, тому його часто комбінують з іншими підсолоджувачами для досягнення більш гармонійного смакового профілю. Попри історичні дискусії щодо безпечності, сучасні дослідження підтверджують його безпечність при дотриманні встановлених норм споживання.

Ацесульфам-К (Е-950). Ацесульфам калію — синтетичний інтенсивний підсолоджувач із солодкістю приблизно у 120–200 разів вищою за сахарозу. Він не засвоюється організмом, не впливає на рівень глюкози чи інсуліну та не має калорійності. Однією з головних переваг ацесульфаму-К є його висока термічна та хімічна стабільність, що дозволяє використовувати його у продуктах, які піддаються нагріванню, стерилізації або тривалому зберіганню. Він часто застосовується у поєднанні з іншими підсолоджувачами, оскільки в чистому вигляді може мати легкий гіркий присмак; синергія з іншими речовинами дозволяє покращити смакові характеристики та зменшити необхідну дозу.

Сукралоза (Е-955). Сукралоза є хлорованою похідною сахарози, у якій частина гідроксильних груп заміщена атомами хлору. Це забезпечує їй високу стабільність і підсолоджувальну здатність приблизно у 600 разів більшу за цукор. Вона практично не розщеплюється ферментами травної системи, майже не всмоктується і виводиться переважно у незміненому вигляді, що робить її некалорійною. Сукралоза добре зберігає солодкість у широкому діапазоні температур і значень pH, тому використовується у напоях, соусах, випічці, молочних продуктах і функціональних харчах. Завдяки смаку, близькому до

сахарози, вона є одним із найбільш універсальних підсолоджувачів у сучасній харчовій промисловості.

Адвантам (Е-969). Адвантам — високоефективний підсолоджувач нового покоління, синтезований на основі структури аспартаму з додаванням ванілінового фрагмента. Він характеризується надзвичайно високою інтенсивністю солодкого смаку — приблизно у 20 000 разів солодший за сахарозу, що дозволяє застосовувати його у мікродозах. Адвантам має високу термічну та хімічну стабільність, що робить його придатним для різноманітних технологічних процесів, включаючи випікання, стерилізацію та тривале зберігання. Через використання у дуже малих кількостях він практично не впливає на енергетичну цінність продуктів і не викликає глікемічної відповіді. Завдяки чистому смаковому профілю та відсутності вираженого післясмаку адвантам розглядається як перспективний інгредієнт для розроблення низькокалорійних і функціональних харчових продуктів.

Сьогодні спостерігається зростаюча потреба у пошуку більш здорових альтернатив рафінованому цукру. У цьому контексті ідеальний замінник повинен забезпечувати нижчу калорійність раціону та сприяти профілактиці карієсу, ожиріння і цукрового діабету. Водночас такі підсолоджувачі мають задовольняти не лише медико-біологічні, а й технологічні вимоги харчового виробництва.

Зокрема, альтернативний підсолоджувач повинен добре розчинятися у воді, бути стабільним у широкому діапазоні значень pH (як у кислому, так і в лужному середовищі), зберігати свої властивості під час технологічної обробки та зберігання за різних температурних режимів. Важливо також, щоб він мав передбачуваний метаболізм в організмі, не спричиняв різких змін рівня глюкози в крові та не втрачав функціональних характеристик у процесі використання.

Крім того, такий інгредієнт повинен бути безпечним для споживання, нетоксичним, не накопичуватися в організмі та відповідати сучасним вимогам до якості й безпечності харчових продуктів, що робить його придатним для регулярного використання в раціоні різних груп населення.

7.5. Харчові натуральні замінники

Харчові натуральні замінники — це продукти природного походження, які використовують для заміни традиційних інгредієнтів з метою підвищення харчової цінності, зменшення калорійності, усунення алергенів або формування більш здорового раціону. Вони широко застосовуються у функціональному, дієтичному, веганському та лікувально-профілактичному харчуванні.

Замінники цукру (натуральні підсолоджувачі). Використовуються для зниження глікемічного навантаження та калорійності. Приклади:

- Мед — містить біологічно активні речовини, антиоксиданти.
- Стевія — природний безкалорійний підсолоджувач, не підвищує рівень глюкози.
- Кленовий сироп — джерело мінералів та поліфенолів.
- Фінікова паста — забезпечує клітковину та природну солодкість.
- Кокосовий цукор — має нижчий глікемічний індекс порівняно з білим цукром.

З урахуванням зазначеного, натуральні продукти зазвичай є привабливими для населення, оскільки їх споживання асоціюється з користю для здоров'я. Тому, як уже наголошувалося, виробництво природних інгредієнтів у харчовій промисловості стає перспективним і цінним напрямом розвитку. Зокрема, відомо, що натуральні поживні підсолоджувачі характеризуються низьким глікемічним індексом і помірним вмістом фруктози. Крім того, такі джерела містять широкий спектр біологічно активних сполук, зокрема поліфеноли, вітаміни, мінеральні речовини та фітонутрієнти. Загалом ці речовини вважаються безпечними, забезпечують організм необхідними нутрієнтами та можуть позитивно впливати на метаболічне здоров'я, сприяти профілактиці надмірної маси тіла й допомагати регулювати рівень глюкози в крові.

У численних наукових публікаціях уже охарактеризовано основні природні поживні підсолоджувачі. До них, зокрема, належать мед, патока (в'язкий продукт, що утворюється під час рафінування цукрової тростини або цукрового буряка), кленовий сироп, нектар агави та кокосовий цукор.

Водночас у цьому контексті доцільно звернути увагу на поліоли та окремі види олігосахаридів. Поліоли широко застосовуються в харчовій промисловості, оскільки мають виражений солодкий смак (приблизно 50–100 % солодкості сахарози) і природно містяться у фруктах, овочах, а також у деяких ферментованих продуктах. Найпоширенішими серед них є ксиліт, маніт, сорбіт і еритритол, які характеризуються зниженою калорійністю порівняно з традиційним цукром.

Окремий науковий інтерес викликають також деякі специфічні олігосахариди. Зокрема, 2'-фукозиллактоза (2'-FL), що належить до олігосахаридів грудного молока, та трегалоза — природний дисахарид, поширений у рослинах, грибах і мікроорганізмах. Ці сполуки можуть слугувати джерелом енергії та розглядаються як інгредієнти з потенційними функціональними властивостями, зокрема щодо підтримки імунної відповіді, регуляції глікемії та метаболічного балансу. Завдяки своїм технологічним і фізіологічним характеристикам вони дозволені до використання як харчові інгредієнти та добавки в промисловому виробництві.

У цілому застосування таких природних підсолоджувальних компонентів відкриває перспективи створення продуктів із покращеним нутрієнтним профілем і зниженою енергетичною цінністю.

7.6. Нехарчові, натуральні підсолоджувачі

Нехарчові натуральні підсолоджувачі — це природні сполуки інтенсивної солодкості, які практично не виконують поживної або енергетичної функції, а застосовуються переважно як смакоутворювальні інгредієнти. На відміну від традиційних цукрів, вони використовуються у дуже малих кількостях, мають низьку або нульову калорійність і не спричиняють суттєвого підвищення рівня глюкози в крові. Їх основне призначення полягає у наданні продуктам солодкого смаку без збільшення енергетичної цінності раціону.

До цієї групи належать стевіолові глікозиди, які отримують із листя стевії. Вони характеризуються високою інтенсивністю солодкості (у сотні разів

перевищують сахарозу), відсутністю калорійності та глікемічного ефекту, а також доброю термостійкістю, що дозволяє використовувати їх у різних технологічних процесах. Подібні властивості мають могрозиди — природні глікозиди з плодів монашого фрукта, які не засвоюються організмом як джерело енергії та додатково проявляють антиоксидантні властивості.

Особливий інтерес становлять солодкі білки природного походження, зокрема тауматин і браззеїн. Вони мають надзвичайно високу солодкість і застосовуються у мікродозах, майже не впливаючи на калорійність продукту. Ці сполуки здатні не лише підсолоджувати, а й модифікувати смак та аромат, що робить їх цінними інгредієнтами при створенні низькокалорійних продуктів. До натуральних інтенсивних підсолоджувачів також відносять гліциризин із кореня солодки, який, окрім солодкого смаку, проявляє функціональні властивості, хоча має специфічний післясмак і частіше використовується у поєднанні з іншими підсолоджувачами.

Загалом нехарчові натуральні підсолоджувачі виконують переважно сенсорну функцію, забезпечуючи солодкість без значного внеску в енергетичний баланс. Їх застосування відкриває широкі можливості для розроблення дієтичних, функціональних і спеціалізованих харчових продуктів зі зниженою калорійністю та контрольованим глікемічним впливом, що є важливим у сучасних підходах до здорового харчування.

Незважаючи на численні корисні властивості згаданих натуральних підсолоджувачів, більшість із них містить значну кількість калорій. Ураховуючи це, а також зростаючу стурбованість населення щодо надмірної ваги, діабету та інших проблем зі здоров’ям, розробка альтернативних натуральних безкалорійних підсолоджувачів набуває особливої актуальності.

У цьому контексті варто виділити стевіольні дитерпенові глікозиди, отримані зі Stevia rebaudiana. Ці сполуки відзначаються високою солодкістю — від 40 до 450 разів перевищують сахарозу, а їхній вміст у сухому листі стевії коливається від 4 до 20 %. Крім солодкого смаку, вони демонструють потенційні користі для здоров’я.

Окрім глікозидів, листя стевії містить ряд біологічно активних сполук, таких як поліфеноли, включно з флаванолами, флавонами, танінами, а також гідроксибензойною та гідроксикоричною кислотами. Завдяки цьому стевія не лише є низькокалорійним та високосолодким інгредієнтом, але й має фармакологічний потенціал, проявляючи антиоксидантні та протизапальні властивості, що робить її одним із найперспективніших натуральних підсолоджувачів.

Найціннішими стевіоловими глікозидами вважаються стевіозид і ребаудіозид А, які, як відзначалося, сприяють підтримці здоров'я. Крім того, слід згадати інші важливі глікозиди — ребаудіозиди B, D та M, які також мають потенційні функціональні властивості.

Зрештою, окрім похідних стевіолу, гліциризин розглядається як ще один перспективний глікозидний підсолоджувач. Цей пентациклічний тритерпеноїд є основним біоактивним компонентом кореня солодки і характеризується приблизно 170-кратною солодкістю порівняно із сахарозою. Крім підсолоджувальних властивостей, гліциризин має широкий спектр фармакологічної активності, зокрема протизапальну та гепатопротекторну дію.

7.7. Харчове застосування фініків як підсолоджувача

Фінік є фруктом з високою поживною цінністю і численними корисними для здоров'я властивостями. Його основними компонентами є вуглеводи та харчові волокна, а також мінерали (особливо калій), вітаміни, антиоксидантні фенольні сполуки та каротиноїди. У меншій кількості фініки містять білки та ліпіди. Завдяки цьому вони найчастіше споживаються у свіжому вигляді, особливо плоди високої якості (першого та другого ґатунку). Фініки нижчої якості класифікують як третій ґатунок або відбраковані, які використовуються для переробки або як корм для тварин.

Різноманітність сортів фінікових пальм та їхня здатність адаптуватися до різних кліматичних умов сприяють їхній широкій популярності у світі. Зростаючий інтерес до фініків та їхніх похідних пояснюється не лише високою

поживною цінністю, а й економічною ефективністю як джерела макро- та мікроелементів, харчових волокон, вітамінів, антиоксидантів і вторинних метаболітів, необхідних для підтримки здоров'я людини. Основною складовою фініків є вуглеводи, насамперед цукри.

Плоди фініків складаються з двох основних частин: їстівної м'якоті, що становить 85–95 % загальної ваги, та насіння (кісточок), яке займає 5–15 % і є побічним продуктом при переробці. Кісточки фініків, багаті на білок, жири та харчові волокна, викликали інтерес як потенційний компонент для функціональних харчових продуктів.

З енергетичною цінністю 300–350 ккал на 100 г, плоди фініків мають різний склад вуглеводів, що залежить від сорту та стадії дозрівання. М'якоть містить легкозасвоювані цукри — глюкозу, фруктозу, манозу, мальтозу та сахарозу, які складають понад 80 % сухої речовини. У сухих фініках переважає сахароза, тоді як м'які плоди багаті на глюкозу та фруктозу. Вміст харчових волокон включає нерозчинну целюлозу, геміцелюлози, пектин, гідроколоїди та лігнін.

Фініки також є джерелом білка (2,5–6,5 г/100 г), жирів, харчових волокон, мінералів та вітамінів, особливо вітамінів групи В. Плоди містять понад двадцять амінокислот, що є рідкістю для фруктів. Насіння фініків має вищий вміст харчових волокон, ніж м'якоть, і містить 5,1–7 % білка, включаючи незамінні амінокислоти, такі як глутамінова кислота, аспарагінова кислота та аргінін. Жири зосереджені головним чином у шкірці м'якоті, тоді як кісточки багаті на олії з ненасиченими жирними кислотами.

Серед важливих мінералів фініків — калій, фосфор, магній, мідь, цинк, селен та залізо, що підтримують роботу нервової системи, міцність кісток, клітинний ріст і транспорт поживних речовин. Низький вміст натрію відповідає рекомендованим нормам споживання. Насіння фініків також містить мінерали, що підвищує їхню харчову цінність.

М'якоть та насіння фініків багаті на біологічно активні сполуки, такі як поліфеноли (флавоноїди, фенольні кислоти), каротиноїди та фітостероли. Ці

речовини визначають антиоксидантні, антидіабетичні, протиожирові, гепатопротекторні, нейропротекторні та антиліпідемічні властивості плодів. Дослідження показали, що фініки містять компоненти, відповідальні за цитотоксичність проти ракових клітин, включно з домінантними фенольними кислотами, такими як р-кумарова, ферулова та ванілова кислоти. Антимікробні дослідження продемонстрували значну активність фініків другого сорту проти різних патогенів, а насіння слугує природним джерелом поліфенолів з потенційною антибактеріальною активністю.

Поліфеноли, зокрема фенольні кислоти та флавоноїди, є основними вторинними метаболітами рослин. Фініки перевершують інші фрукти за їхнім вмістом, а концентрація та різноманітність цих сполук залежать від сорту, стадії дозрівання та умов навколишнього середовища. Галова кислота є основним фенольним компонентом у м'якоті, а насіння містить галову та сирингову кислоти, а також ферулову, ванілову та р-кумарову кислоти.

Щодо флавоноїдів, м'якоть фініків багата на кверцетин, тоді як насіння містить рутин, кверцетин, лютеолін, катехін та епікатехін. Концентрація флавоноїдів у насінні, як правило, нижча, ніж у м'якоті.

Таким чином, фініки другого сорту мають значний потенціал як ефективні, безпечні та економічно вигідні природні антиоксиданти. Це створює можливості для їх використання у функціональних харчових продуктах та нутрицевтиці, підкреслюючи переваги фініків, що перевищують їхню базову харчову цінність.

Підвищене споживання цукру пов'язане з низкою негативних наслідків для здоров'я, зокрема карієсом, діабетом 2-го типу та серцево-судинними захворюваннями, особливо серед дітей та підлітків. У зв'язку з цим значна частина сучасних споживачів свідомо прагне до здоровішого способу життя, намагаючись зменшити вживання цукру та віддавати перевагу натуральним альтернативам. Цей тренд сприяє підвищеному інтересу до розробки харчових продуктів із натуральними підсолоджувачами, отриманими з природних джерел.

Дослідження показують, що альтернативи цукру, наприклад продукти з фінікової пальми, містять значну кількість біологічно активних сполук —

антиоксидантів, мінералів, харчових волокон та інших фітохімічних речовин. Завдяки таким корисним властивостям фініки рекомендується включати до раціону, а також розглядати як перспективний замінник рафінованого цукру у виробництві твердих, напівтвердих та рідких харчових продуктів.

Харчові матриці є оптимальним носієм для забезпечення біодоступності корисних сполук фініків. Такий підхід не лише підвищує користь продуктів для здоров'я, а й додає цінності субпродуктам із фініків, сприяючи принципам циркулярної економіки в харчовій промисловості.

Фініки та продукти з них — сиропи, соки, спреди, паста, рідкий цукор — можуть функціонувати як натуральні підсолоджувачі, забезпечуючи організм вітамінами, мінералами, фітохімічними сполуками та антиоксидантами. На відміну від рафінованого цукру, який не містить поживних речовин і має «порожні калорії», фініки надають додаткові функціональні властивості.

Крім того, фініки мають універсальне застосування, виходячи за рамки підсолоджувачів. Вони можуть виступати барвниками та ароматизаторами, надаючи продуктам солодкий смак та функціональні властивості. Такі продукти включають напої, кондитерські вироби, десерти, хлібобулочні вироби та молочні продукти.

Багато досліджень присвячено додаванню фініків та продуктів із них (сиропу, екстракту, порошку) у молочні продукти, десерти, напої, цукерки, печиво, хліб, снек-батончики та пластівці. Інтеграція фініків у рецептури є ефективною стратегією для створення функціональних харчових продуктів із покращеними поживними та сенсорними властивостями.

7.8. Перспективи застосування підсолоджувачів у харчовій промисловості: майбутні тенденції та інновації

Зростаючий інтерес споживачів до здорового способу життя, контролю над споживанням цукру та профілактики хронічних захворювань стимулює активний розвиток інновацій у харчовій промисловості. Підсолоджувачі, особливо натурального походження, стають ключовим елементом сучасних

продуктів, дозволяючи зменшити калорійність і одночасно підвищити функціональну цінність.

1. Натуральні та безкалорійні альтернативи. Натуральні підсолоджувачі, такі як стевіольні глікозиди, гліциризин, фініки, монах фрукт та поліоли, забезпечують високу солодкість при мінімальному впливі на глікемічний рівень. Їх використання дозволяє створювати продукти для людей із надмірною вагою, діабетом або метаболічними порушеннями. Розробка комбінацій різних підсолоджувачів відкриває можливості отримання більш природного смаку та стабільних технологічних характеристик.

2. Функціональні властивості та біоактивність. Багато сучасних підсолоджувачів містять біологічно активні сполуки — поліфеноли, каротиноїди, вітаміни, мінерали та харчові волокна. Їхнє включення у продукти підвищує антиоксидантну, протизапальну, гепатопротекторну, нейропротекторну та метаболічну користь. Це відкриває перспективу створення функціональних продуктів, які не лише забезпечують солодкий смак, а й сприяють підтримці здоров'я.

3. Технологічні інновації та нові формати продуктів. Розробка нових типів підсолоджувачів, включаючи олігосахариди, білкові підсолоджувачі, ферментовані та синтетично модифіковані сполуки, дозволяє створювати харчові продукти із високою солодкістю та низькою калорійністю, з покращеними сенсорними характеристиками. Інновації в технології виробництва, такі як інкапсуляція підсолоджувачів, покращують їхню стабільність у різних харчових матрицях та забезпечують рівномірне розподілення смаку у готових продуктах.

4. Використання у різних харчових категоріях. Підсолоджувачі інтегрують у широкий спектр продуктів: напої, кондитерські вироби, десерти, хлібобулочні вироби, молочні продукти, снек-батончики та пластівці. Крім заміни цукру, вони можуть виконувати роль ароматизаторів, барвників і текстуризаторів, що підвищує функціональну цінність та інноваційність продукту.

5. Економічні та екологічні аспекти. Використання натуральних підсолоджувачів сприяє ефективному використанню сировини та побічних продуктів, зменшенню харчових відходів і підтримці принципів циркулярної економіки. Це не лише підвищує економічну ефективність виробництва, а й відповідає сучасним екологічним та сталим практикам харчової промисловості.

6. Майбутні тенденції. Перспективи розвитку включають:

- ✓ Поєднання різних типів підсолоджувачів для створення оптимального смакового профілю;
- ✓ Використання підсолоджувачів у функціональних і «smart food» продуктах із додатковими оздоровчими властивостями;
- ✓ Інтеграція підсолоджувачів у готові страви та напої для зменшення калорійності та підвищення харчової цінності;
- ✓ Розробка інноваційних технологій інкапсуляції та мікроемульсій для підвищення стабільності та біодоступності активних компонентів;
- ✓ Використання побічних продуктів виробництва підсолоджувачів для створення нових харчових інгредієнтів та добавок.

Натуральні та безкалорійні підсолоджувачі стають основою інновацій у харчовій промисловості, дозволяючи створювати функціональні, дієтичні та безпечні продукти з високими сенсорними та поживними характеристиками. Майбутні тенденції спрямовані на поєднання смаку, здоров'я та стійкості виробництва, що відкриває широкі можливості для розвитку сучасних харчових продуктів.

Питання для самоконтролю

1. За якими критеріями класифікують різні типи підсолоджувачів?
2. На які групи поділяють підсолоджувачі залежно від їх складу та походження?
3. У яких видах харчових продуктів найчастіше застосовують сукралозу?
4. У чому полягає основна різниця між штучними підсолоджувачами та натуральними цукрами?
5. Що таке могрозид і до якого типу підсолоджувачів він належить?

6. З якою метою проводять інкапсуляцію підсолоджувачів у харчових продуктах?

7. За якими ознаками можна оцінювати якість та властивості штучних замінників цукру?

8. Які особливості має аспартам як підсолоджувач у харчових продуктах?

9. Що таке фінік і які його специфічні властивості роблять його альтернативою цукру?

10. З яких компонентів складаються плоди фініка?

11. Які важливі мінерали, вітаміни та поживні речовини містяться у фініках?

12. Які лікувальні та корисні властивості притаманні фінікам і продуктам із них?

13. У яких харчових продуктах фініки бажано застосовувати з урахуванням їх функціональних властивостей?

14. Які біологічно активні сполуки містять натуральні підсолоджувачі і яку користь вони приносять організму?

15. Які різновиди стевіолових глікозидів є найбільш ефективними для харчової промисловості?

16. Які властивості гліциризину роблять його перспективним натуральним підсолоджувачем?

17. Як поліоли та олігосахариди використовуються у виробництві низькокалорійних продуктів?

18. Які переваги використання фініків у напоях, десертах та кондитерських виробах?

19. Як натуральні підсолоджувачі сприяють розвитку функціональних харчових продуктів та нутрицевтики?

20. Які сучасні технологічні методи дозволяють покращити стабільність і солодкість підсолоджувачів у харчових матрицях?

Рекомендована навчальна література

1. Харчові добавки : підручник / І. П. Радзієвська, Т. П. Новікова, О. С. Корзун та ін. Київ : Кондор, 2018. 324 с.
2. Оболкіна В. І. Технологія кондитерських виробів спеціального призначення : навч. посіб. / В. І. Оболкіна. Київ : НУХТ, 2014. 215 с.
3. Сирохман В. А. Товарознавство харчових продуктів функціонального призначення : підручник / В. А. Сирохман, В. М. Завгородня. Київ : Центр навч. л-ри, 2017. 544 с.
4. Ситник Н. В. Хімія харчових продуктів : навч. посіб. / Н. В. Ситник. Київ : Кондор, 2017. 320 с. (
5. Дубова Г. Є. Нові види підсолоджувачів у харчових технологіях : монографія / Г. Є. Дубова. Харків : Світ книг, 2019. 160 с.
6. Павлюк Р. Ю. Технологія продуктів функціонального призначення : навч. посіб. / Р. Ю. Павлюк, В. В. Погарська. Харків : ХДУХТ, 2015. 248 с.
7. Грегірчак Н. М. Харчові добавки : навч. посіб. / Н. М. Грегірчак. Київ : НУХТ, 2016. 240 с.
8. Sweeteners and Sugar Alternatives in Food Technology / ed. by K. O'Donnell, G. W. Kearsley. 2nd ed. Oxford : Wiley-Blackwell, 2012. 432 p.
9. Alternative Sweeteners / ed. by L. O'Brien Nabors. 4th ed. New York : CRC Press, 2011. 588 p.

Розділ 8. ПРИРОДНІ ПОЛІСАХАРИДИ: ДЖЕРЕЛА, ХАРАКТЕРИСТИКИ, ВЛАСТИВОСТІ, ХАРЧОВІ ТА ФАРМАЦЕВТИЧНІ ЗАСТОСУВАННЯ

8.1. Композитні матеріали на основі природних полісахаридів

Природні полісахариди, розглянуті в цьому розділі, належать до найбільш поширених біополімерів, що застосовуються у харчовій, фармацевтичній і медичній галузях, адже вони є відновлюваними, біосумісними та здатними до біодеградації. Повноцінне використання їхнього потенціалу в біокомпозитах, нанокон'югатах і фармацевтичних розробках можливе лише за умови глибокого вивчення їхньої структури та властивостей.

Порівняно з багатьма іншими полімерами, полісахариди мають переваги завдяки своїй біосумісності, біологічній активності, однорідності та здатності до біоадгезії. Вони характеризуються вираженими реологічними та мукоадгезивними властивостями, що робить їх перспективними для створення різноманітних ефективних і економічно доцільних систем доставки лікарських засобів.

> **Мукоадгезія** — це властивість певних матеріалів прикріплюватися до поверхні слизових оболонок організму людини або тварин. Вона розглядається як окремий різновид біоадгезії, що стосується взаємодії та фіксації матеріалів на біологічних поверхнях загалом.

Композити, створені на основі природних полісахаридів, набули широкого застосування завдяки своїм багатофункціональним характеристикам. Вони викликають значний інтерес у світі та мають високий попит через біохімічні властивості, подібні до характеристик клітин організму людини й тварин. Попри те, що синтетичні полімери займають важливе місце в органічній хімії, саме природні полімери мають вирішальне значення для багатьох галузей, зокрема біомедичної, фармацевтичної та навіть будівельної сфери.

Протягом останніх десятиліть активно створюються більш екологічні види пластмас, покликані скоротити використання невідновлюваної сировини у виробництві. Це зумовлено зростанням усвідомлення необхідності зменшення

негативного впливу традиційних полімерів на довкілля. Концепція сталого розвитку передбачає поступову заміну нафтохімічних матеріалів екологічно безпечнішими альтернативами в різних галузях промисловості.

У зв'язку з цим розширення виробництва та застосування біоосновних полімерів упродовж останніх років зробило біополімери одним із найперспективніших напрямів досягнення цієї мети. Значну зацікавленість викликає переробка агропродовольчих відходів, а також використання біополімерів, синтезованих дріжджами, водоростями чи бактеріями, або виділених безпосередньо з біомаси — зокрема полісахаридів, білків і ліпідів. Такі матеріали знаходять застосування у виробництві медичних виробів, харчової упаковки, сільськогосподарських плівок, мембранних технологій, екологічного текстилю та інших сферах. Водночас, попри досягнуті успіхи, біоосновні полімери й надалі потребують удосконалення.

Природні полімери можна класифікувати за їх походженням на шість основних груп: полісахариди, білки, полінуклеотиди, поліефіри, лігнін та поліізопрени. Полісахариди та поліпептиди часто застосовують як носії лікарських засобів у терапії раку.

До переваг природних полімерів, особливо полісахаридних, належать висока біосумісність, доступність, стабільність, нетоксичність, економічність та здатність до біологічного розкладання.

Деякі полісахариди, серед яких крохмаль, декстран, пулулан, альгінат, пектин, хітин, хітозан, гіалуронова кислота, а також білки — альбумін і желатин, та гуарова камедь — використовуються для створення наноносіїв у раковій терапії, як зазначено у сучасній літературі.

Для створення наночастинок на основі полісахаридів застосовують різні підходи, такі як комплексоутворення поліелектролітів, самозбірка гідрофобно модифікованих полімерів, ковалентне або іонне зшивання та інші методи.

Більшість природних полімерів є конденсаційними, тобто вони швидко формуються як побічний продукт при з'єднанні мономерних одиниць з виділенням малих молекул, найчастіше води. Інші полімери утворюються без

утворення побічних продуктів шляхом прямого з'єднання мономерів, що вже містять полімерні фрагменти. Природні полімери поділяють на шість основних груп за походженням: поліефіри, лігнін, поліізопрени, полісахариди, полінуклеотиди та білки. Особливу увагу приділяють полісахаридам і білкам через їхню біосумісність і зручність у технологічному використанні. Виробництво природних біополімерів можливе у водоростей, рослин, тварин, бактерій та інших мікроорганізмів.

Допоміжні речовини, отримані з природних полімерів, широко застосовуються у фармацевтичній промисловості. Зокрема, в емульсіях використовують антипінні агенти, такі як силікон, рослинна камедь, целюлоза, крохмаль та полівінілацетат. Основна їхня функція полягає у запобіганні утворенню піни та збереженні сприятливих органолептичних властивостей препаратів, таких як смак, запах і текстура.

Біологічно розкладні біополімери, одержані з відновлюваних ресурсів, можна розділити на три основні категорії:

1) Полімери рослинного та тваринного походження – до них належать полісахариди, такі як целюлоза, крохмаль, хітин і хітозан, а також білки, що використовуються як основа для різних лікарських форм і матриць.

2) Похідні мікроорганізмів – наприклад, полігідроксибутират, який виробляють бактеріальні культури і який знаходить застосування у виробництві біорозкладних упаковок та медичних матеріалів.

3) Полімери, що утворюються опосередковано – вони формуються шляхом полімеризації мономерів, що дозволяє створювати матеріали з контрольованими фізико-хімічними властивостями для спеціалізованих фармацевтичних застосувань.

Хітин (хімічна назва – полі-N-ацетил-D-глюкозо-2-амін) є азотовмісним полісахаридом, який за своєю хімічною структурою дуже нагадує целюлозу. Основна відмінність полягає в тому, що на кожному шестичленному мономерному кільці замість гідроксильної групи (–OH) розташована аміногрупа, один з атомів водню якої заміщений на ацетильну групу.

Ця структурна особливість визначає специфічні фізико-хімічні та біологічні властивості хітину, роблячи його важливим компонентом оболонок комах, панцерних тварин і грибів, а також цінним біополімером для медичних і промислових застосувань.

Хітозан – це амінополісахарид, який утворюється шляхом дезацетилювання хітину, тобто видалення ацетильних груп із його молекули. Його хімічна структура представлена як 2-аміно-2-дезокси-β-D-глюкан, що робить його водорозчинним у слабких кислотах і надає специфічні фізико-хімічні та біологічні властивості, завдяки яким хітозан широко застосовується в медицині, фармацевтиці та біотехнології.

Полімери, що утворюються опосередковано зазвичай отримують із рослинних ресурсів, наприклад молочної кислоти, і вони утворюються в процесі бродіння цукрів або при синтезі реакційно здатних мономерів із рослинних олій у поєднанні з цукрами. У медицині застосовують різні біополімери, оскільки вони нетоксичні та добре сумісні з організмом людини. До інших біополімерів, придатних для фармацевтичного використання, належать целюлоза, поліамінокислоти та полігідроксіалканоати, які забезпечують різноманітні функціональні властивості лікарських форм та медичних матеріалів.

8.2. Класифікація природних полісахаридів

Полісахариди, що належать до третього основного класу біополімерів — вуглеводів, відіграють ключову роль у багатьох біологічних процесах, зокрема в імунній відповіді, згортанні крові, запліднені, профілактиці патогенних процесів та терапевтичній активності. Вони беруть участь у підтримці клітинної структури, накопичені енергії, змащенні тканин і передачі клітинних сигналів.

За своєю хімічною структурою полісахариди складаються з моносахаридних одиниць, з’єднаних глікозидними зв’язками, і саме це робить їх найбільш поширеним типом вуглеводів у природі. Вони також можуть утворювати ковалентні зв’язки з іншими біомолекулами, такими як ліпіди, пептиди та амінокислоти. Гомополісахариди, або гомоглікани, складаються з одного типу моносахариду, тоді як гетерополісахариди (гетероглікани) містять

різні моносахаридні одиниці. Для з'єднання гомополімерів глюкози або аміноцукрів зазвичай використовуються оцтові (глікозидні) зв'язки.

За сучасними даними, полісахариди є найбільш поширеним відновлюваним ресурсом у світі: щороку фотосинтез продукує в кілька порядків більше вуглеводів, ніж синтезується штучно.

Полісахариди класифікують за їхньою структурою та функціями. Виділяють три основні категорії:

Структурні полісахариди – до них належать целюлоза та хітин, які забезпечують механічну міцність і підтримку клітинних та тканинних структур.

Накопичувальні полісахариди – такі як крохмаль і глікоген, що слугують резервом енергії.

Гелеутворюючі полісахариди – наприклад альгінова кислота та мукополісахариди, які утворюють гелі та відіграють роль у в'язкості та змащенні біологічних середовищ.

Полісахариди можуть бути іонними або неіонними, мати катіонні або аніонні групи, а також мати розгалужені або лінійні ланцюги. Природні полісахариди, такі як целюлоза, характеризуються високою стабільністю та фізичною структурою, що дозволяє їм утримувати поживні речовини, наприклад крохмаль.

Серед полісахаридів із зарядом аніонними є пектин, гепарин, гіалуронова кислота та альгінат, тоді як хітозан має позитивний заряд і відноситься до катіонних полісахаридів. Пектин, пектинол та альгінат належать до поліелектролітів і використовуються у фармацевтичних і біотехнологічних застосуваннях завдяки своїм зарядовим та гідрофільним властивостям.

Целюлоза. Оскільки целюлоза становить основну частину клітинних стінок рослин і близько половини біомаси фотосинтезуючих організмів, вона вважається однією з найпоширеніших хімічних сполук на Землі. Традиційними джерелами целюлози є природні матеріали, такі як бавовна, льон, деревина, коноплі, джут, кенаф, соломка зернових, цукрові буряки та льон. Крім рослин, целюлозу продукують деякі бактерії, наприклад Acetobacter, а також водорості,

такі як Valonia та Microdicyon, і деякі морські тварини родини Ascite. Целюлоза використовується у промисловості та фармацевтиці завдяки своїй механічній міцності, біосумісності та здатності утворювати волокна і плівки.

Хімічна структура та властивості целюлози. Молекула целюлози має три гідроксильні групи на кожному мономері, за винятком кінцевих одиниць. Ці гідроксильні групи формують внутрішньо- та міжмолекулярні водневі зв'язки, що призводить до утворення супрамолекулярного полімеру з кристалічними, тобто впорядкованими, ділянками. У місцях, де молекули целюлози організовані випадковим чином, утворюються аморфні області, що поєднують кристалічні ділянки.

Будова целюлози істотно визначає її реакційну здатність. Гідроксильні групи на поверхні молекул можуть формувати як внутрішньомолекулярні, так і міжмолекулярні водневі зв'язки, що забезпечує лінійну цілісність полімерних ланцюгів. Водночас целюлоза має деякі внутрішні обмеження: низьку стійкість до механічного зминання, погану розчинність у більшості розчинників та відсутність термопластичності. Для покращення її властивостей застосовують контрольовану хімічну або фізичну модифікацію поверхні.

Зокрема, введення сторонніх функціональних груп на поверхню молекул целюлози дозволяє змінити хімічний склад поверхні, не впливаючи на критично важливі внутрішні властивості полімеру, такі як здатність до самозборки, контрольована дисперсія в матричних полімерних системах і підвищення міцності зв'язку «частинка–частинка» або «частинка–матриця».

Целюлоза та її похідні широко застосовуються у фармацевтиці, зокрема в системах доставки лікарських речовин. До таких похідних належать прості та складні ефіри целюлози, оксицелюлоза, а також натрійкарбоксиметилцелюлоза, метилцелюлоза, етилцелюлоза, гідроксипропілцелюлоза та гідроксипропілметилцелюлоза. Ці модифіковані форми дозволяють регулювати розчинність, в'язкість та здатність до утворення плівок, що робить їх незамінними у фармацевтичних та біотехнологічних застосуваннях.

Геміцелюлози. Ще одним важливим компонентом рослинних клітин є геміцелюлози, які формують матрицю навколо целюлозних мікрофібрил. Вони складаються з різноманітних молекул, таких як ксилоглюкани, ксилани, маннани та (1–3)-(1–4)-глюкани. Хімічні взаємодії, включаючи водневі зв'язки та сили Ван-дер-Ваальса, забезпечують міцне зв'язування геміцелюлоз із целюлозними мікрофібрилами, що сприяє стабільності клітинної стінки.

Геміцелюлози виконують також функції метаболічного резерву та сигнальних молекул у клітинах. За обсягом виробництва вони є другим за поширеністю відновлюваним компонентом лігноцелюлозної біомаси після целюлози, з глобальним щорічним виробництвом понад 60 мільярдів тон.

Пектин. Клітинні стінки рослин містять не лише целюлозу, геміцелюлози та лігнін, але й пектин — важливий полісахарид, що належить до групи гідроколоїдів разом із агаром та мукополісахаридами, здатних утворювати гелі. Пектин є одним із найважливіших гідроколоїдів у харчовій промисловості та широко використовується для загущення, желювання та стабілізації різних продуктів харчування.

Основними промисловими джерелами пектину є цитрусові та яблука, що дають пектин із високим вмістом метоксильних груп (>50%). У той же час пектин із соняшнику є природним джерелом пектину з низьким вмістом метоксилу (≤50%), що дозволяє використовувати його для специфічних технологічних застосувань, зокрема в виробництві низькокалорійних желе та інших харчових продуктів.

Крохмаль. Чистий крохмаль являє собою білий без запаху порошок і є полісахаридом, що складається з двох основних компонентів: амілози та амілопектину. Їх співвідношення залежить від джерела та виду крохмалю, проте зазвичай амілоза становить близько 20–25%, а амілопектин – 75–80% від загальної маси.

У рослинах крохмаль накопичується у вигляді зерен у плодах, насінні, коренях, листках, бульбах, серцевині стебла та кореневищах і виконує роль головного полісахариду для зберігання енергії. Він є важливим джерелом

вуглеводів у харчовому раціоні людини, становлячи основну частину споживання вуглеводів у продуктах, таких як картопля, рис, пшениця, кукурудза та маніока.

Глікоген. Глікоген — це ще один тип запасних полісахаридів, що накопичує енергію. Він структурно схожий на амілопектин, але має більш щільну і сильно розгалужену будову. У тварин глікоген зберігається в цитоплазмі клітин і є головним резервом глюкози для підтримки енергетичного метаболізму. Хоча глікоген відіграє важливу роль у фізіології організму, він не має значного промислового застосування і згадується тут головним чином для повноти опису запасних полісахаридів.

Хітин. Хітин — це лінійний полісахарид тваринного походження, який характеризується високою гідрофобністю та наявністю ацетильних і аміногруп у своїй структурній одиниці. Він нерозчинний у воді та звичайних органічних розчинниках, проте добре розчиняється у спеціальних середовищах, таких як диметилацетамід із 5% хлоридом літію або хлорспирти у водних розчинах мінеральних кислот.

Як структурний полісахарид, хітин є поширеним компонентом міцелію та спор грибів, а також екзоскелетів комах, панцерних тварин і багатьох інших безхребетних. Його міцність і хімічна стабільність визначають важливу роль у формуванні механічної підтримки та захисних структур у тваринних організмах.

Гіалуронова кислота. Гіалуронова кислота належить до групи глікопротеїнів, відомих як мукополісахариди або муцини. На відміну від багатьох інших полісахаридів, таких як гепарин, вона є одним із небагатьох полісахаридів, що зустрічаються у тканинах хребетних, особливо часто — у ембріональному періоді розвитку. Гіалуронова кислота ковалентно пов’язана з білками і є частиною структури протеогліканів.

Гіалуронан представляє собою прямоланцюговий полісахарид із високою молекулярною масою близько $7 \cdot 10^6$ г/моль. Він часто утворює водневі зв’язки з білками та водою, що ускладнює його виділення та очищення. Завдяки своїм біологічним властивостям гіалуронова кислота знаходить застосування у

медицині, зокрема у хірургії та матеріалах для загоєння ран, часто у поєднанні з альгінатом для покращення регенерації тканин.

Альгінат. Альгінат, отриманий із морських водоростей, є довголанцюговим гідрофільним полісахаридом, який забезпечує гнучкість і міцність клітинних стінок водоростей. Його використовували в харчуванні ще з 600 року до нашої ери, проте лише в 1896 році Akrefting вперше ефективно виділив чистий альгінат з морських водоростей. У 1929 році компанія Kelco застосувала альгінат як стабілізатор у виробництві морозива, після чого він став комерційно доступним продуктом.

Альгінат є безпечним і натуральним харчовим інгредієнтом із численними біологічними властивостями: здатністю до іонного зшивання, чутливістю до pH, високою біосумісністю та біорозкладністю. Ці властивості забезпечують його широке застосування в харчовій промисловості та нутрицевтиці. Крім того, альгінат є єдиним природним полісахаридом, що містить карбоксильні групи у кожному залишку своєї структури, що визначає його унікальні фізико-хімічні та біологічні характеристики.

Природні полісахариди відіграють ключову роль у структурі, метаболізмі та функціонуванні живих організмів, виконуючи як структурні, так і запасні функції. Структурні полісахариди, такі як целюлоза, геміцелюлози, хітин і альгінат, забезпечують механічну міцність і стабільність клітинних стінок рослин, грибів та безхребетних. Запасні полісахариди, зокрема крохмаль і глікоген, слугують джерелом енергії в рослинах і тваринах. Мукополісахариди, до яких належать пектин, гіалуронова кислота та альгінат, виконують важливі функції у міжклітинній матриці, утворенні гелів, сигнальній взаємодії та біологічній сумісності.

Біополімери, отримані з природних джерел, мають унікальні хімічні та фізичні властивості, що дозволяють їх використовувати в харчовій, фармацевтичній та біотехнологічній промисловості. Характеристика полісахаридів, включаючи їхню розчинність, здатність до гелеутворення,

ковалентне або водневе зв'язування та біосумісність, робить їх універсальними матеріалами для наукових і практичних застосувань.

Загалом, природні полісахариди є найпоширенішими відновлюваними ресурсами на планеті, і їхнє вивчення та модифікація відкривають широкі перспективи для створення нових матеріалів, лікарських форм та біоінженерних продуктів.

8.3. Переробка та характеристика природних полімерів

Двома основними етапами переробки полімерів є:

1) Перетворення полімерів у кінцеві вироби із заданою структурою, такі як каркаси, мікроголки, листи для упаковки харчових продуктів тощо. Цей етап зазвичай включає процеси екструзії, змішування та формування матеріалу.

2) Перетворення полімерів у порошки та гранули для подальшої обробки, яке може здійснюватися за допомогою лиття під тиском, лиття в плівку або інших методів формування.

Для ефективної переробки необхідно попередньо охарактеризувати полімери, визначивши їхні фізико-механічні властивості, такі як міцність, теплопровідність, мікроструктура та щільність. Окрім цього, оцінюють їхню корисність для конкретного застосування, відповідність стандартам якості та безпечність для використання у промислових і харчових продуктах.

Суміші та композити полімерів. Полімери широко застосовуються як у складі матриць, так і в ролі наповнювачів у сумішах і композитах. Композит – це багатофазна система, що складається з двох або більше різнорідних компонентів, які взаємодіють між собою, але при цьому зберігають свої індивідуальні фізичні та хімічні властивості. Типовий композит складається з наповнювача — тканого полотна, металевого, керамічного або полімерного волокна — і полімерної матриці, що об'єднує компоненти.

Застосування композитів обумовлене тим, що однокомпонентні синтетичні або природні матеріали не завжди можуть забезпечити необхідні фізичні чи фізико-хімічні властивості. Композити можна виготовляти як із

синтетичних, так і з природних полімерів. Поєднання природних та синтетичних полімерів дозволяє створювати матеріали з новими властивостями та розширеним спектром застосувань.

Сучасне виробництво синтетичних полімерів забезпечує стабільність продукту та простоту виготовлення, але водночас викликає занепокоєння щодо впливу на навколишнє середовище через низьку біорозкладність і потенційну токсичність. Це зумовило підвищену популярність композитів на основі природних полімерів у останні роки.

Коли два або більше полімерів фізично поєднуються, у розплавленому стані або в розчині, утворюються полімерні суміші. Такі суміші можуть бути використані для створення різних структур: молекулярних композитів, однофазних та багатофазних систем, сумісних і несумісних сплавів, взаємопроникаючих та напіввзаємопроникаючих полімерних мереж.

Категорії полімерних сумішей. Полімерні суміші поділяються на дві основні категорії: сумісні та несумісні суміші.

Несумісні суміші складаються з компонентів, які не змішуються, утворюючи чітко відокремлені фази. Через це механічні властивості таких сумішей зазвичай залишають бажати кращого.

Сумісні суміші утворюють єдину фазу, в якій окремі компоненти морфологічно не розрізняються. Такі суміші зазвичай демонструють значно кращі механічні характеристики порівняно з окремими полімерами, що входять до їх складу.

Хоча сумісні суміші мають переваги у властивостях, несумісні полімерні суміші зустрічаються у природі та промисловості значно частіше, ніж сумісні, що зумовлено природними властивостями полімерів та їх взаємодією на молекулярному рівні.

Полімерні суміші та композити дозволяють поєднувати різні матеріали для отримання нових властивостей, таких як міцність, гнучкість та стабільність структури. Сумісні суміші формують однорідні фази з покращеними механічними характеристиками, тоді як несумісні містять окремі фази і зазвичай

мають нижчу міцність. Використання природних полімерів у сумішах і композитах підвищує біосумісність та екологічну безпечність матеріалів, що робить їх перспективними для харчової, фармацевтичної та біотехнологічної промисловості.

8.4. Техніка обробки

Виробництво полімерних композитів. Вибір технології для виготовлення полімерних композитів визначається кількома ключовими факторами, зокрема природою волокна та типом полімеру, а також кінцевим призначенням виробу. Це можуть бути конструкційні матеріали для будівництва, компоненти автомобілів або біологічні застосування, такі як будівельні ліси та матеріали для загоєння ран.

Екструзійне формування. Екструзія є одним із найпоширеніших методів формування полімерів. Під час процесу полімери, з додаванням або без додаткових полімерів і модифікаторів, розплавляються під впливом тепла та зсувних сил для створення однорідних сумішей або композитів. Для досягнення необхідної однорідності та форми полімери часто обробляють у стані розплаву, особливо коли вони використовуються як матриці в інженерних або медичних матеріалах. На відміну від лиття під тиском, де розплавлений полімер заповнює порожнину форми і охолоджується там, екструзія базується на неперервному витискуванні розплаву через шнек для отримання виробів заданої форми та розмірів.

Лиття розчинником. Лиття розчинником часто застосовується для виготовлення полімерних плівок, що є ключовими для багатьох сфер застосування, включаючи пакування, трансдермальну доставку ліків, загоєння ран та створення покриттів. Від здатності полімерів формувати плівки залежать їхні фізико-хімічні властивості, зокрема однорідність і консистенція, які є критичними для функціональності виробів. Для досягнення бажаних властивостей плівок використовують різні технології: самопоглинання моношарів, центрифугування, термічне напилення, лиття розчинником,

плаваюча техніка та метод Ленгмюра–Блоджетта. Кожен із цих методів дозволяє отримати плівки з визначеними морфологічними та механічними характеристиками, необхідними для конкретного застосування.

> **Плівки Ленгмюра–Блоджетта** представляють собою моно- та багатошарові полімерні покриття, які формуються шляхом перенесення молекул з межі розділу рідина–повітря на тверду підкладку. Цей метод дозволяє отримувати плівки з високою однорідністю та контрольованою структурою шарів, що важливо для спеціалізованих застосувань у нанотехнологіях, фармацевтиці та матеріалознавстві.

Двома найпоширенішими методами виготовлення полімерних плівок є лиття з розчину та нанесення покриття методом центрифугування. У цих системах полімерна матриця формується із желатину, отриманого зі шкіри риби, тоді як армуючий компонент представлений целюлозними волокнами, виділеними з бавовняного лінту, що забезпечує підвищену механічну міцність та стабільність плівки.

Наночастинки целюлози. Зменшення розміру частинок полімеру до мікро- або наномасштабу значно покращує його функціональні властивості та ефективність у композитних матеріалах. Наноцелюлоза наразі є предметом інтенсивних досліджень завдяки її потенціалу у створенні високоефективних полімерних композитів. Виробництво наноцелюлози може здійснюватися двома основними підходами: «знизу вгору», коли бактерії, зокрема види Acetobacter, синтезують наноцелюлозу біотехнологічним шляхом, та «зверху вниз», коли наноцелюлоза отримується шляхом механічного або хімічного розщеплення рослинних компонентів. Додатковими джерелами наноцелюлози є водорості та оболонкові структури різних організмів.

Структурна характеристика полімерів. Структурна характеристика полімерів, зокрема полісахаридів, визначає їх конформацію і ґрунтується на аналізі енергетичних особливостей обертання навколо хімічних зв’язків. Це особливо важливо для сполук із відомими конформаціями, таких як полі- та олігосахариди. Геометрія ланцюга полісахариду або олігосахариду може бути

визначена через аналіз двогранних кутів обертання моносахаридних одиниць, що дозволяє оцінити можливі випадкові чи регулярні структури ланцюга. Наприклад, полісахарид з різними поворотами у кожній моносахаридній ланці матиме більш випадкову конформацію, тоді як взаємодії між ланцюгами обмежують свободу обертання і стабілізують певну структуру.

Конформація полімеру безпосередньо впливає на його функціональні властивості. Так, целюлоза та амілоза складаються з однакових мономерів – (1→4)-β-D-глюканів – але мають різні просторові структури: амілоза утворює спіральні ланцюги, тоді як целюлоза формує розтягнуті зигзагоподібні ланцюги. Саме ця відмінність робить целюлозу нерозчинною у воді та неїстівною.

Структурна характеристика також визначає кристалічну або аморфну природу полімеру. Кристалізовані сполуки зазвичай мають більш міцні та стабільні структури. На відміну від білків, які здатні зберігати кристалічні форми навіть у розчинах, полісахариди рідко утворюють кристалічні структури. Для дослідження конформації та внутрішньої структури полімерів використовуються методи рентгенівської дифракції, магнітного резонансу, інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є та малокутового рентгенівського розсіювання.

Малокутове рентгенівське розсіювання (SAXS). Малокутове рентгенівське розсіювання (SAXS) ґрунтується на використанні рентгенівських променів під малими кутами і дозволяє швидко аналізувати структуру полімерів, таких як білки та полісахариди, у розчині. Основою методу є взаємний зв'язок між відстанню r у реальному просторі та вектором розсіювання q у просторі Фур'є, що дозволяє відтворювати просторову організацію макромолекул. SAXS є швидким методом структурної характеристики полімерів із низькою роздільною здатністю і може комбінуватися з іншими аналітичними підходами для більш детального аналізу. За допомогою математичних моделей, що описують профіль розсіювання, можна визначати різні параметри макромолекул, за умови відомих властивостей використовуваного рентгенівського випромінювання. Основна перевага SAXS полягає у можливості дослідження

макромолекул у розчині, а не лише у кристалізованому стані, що особливо важливо для природних полімерів, які складно кристалізувати.

Ядерний магнітний резонанс (ЯМР). Спектроскопія ядерного магнітного резонансу (ЯМР) є сайт-специфічним методом, що дозволяє досліджувати окремі функціональні групи, бічні та головні ланцюги полімерних молекул у конкретних ділянках. Метод дає можливість оцінювати молекулярний рух та структурні зміни полімеру у часі. ЯМР забезпечує високу чутливість до мікроскопічної організації у ближньому порядку, проте інформація про віддалені та більш високопорядкові структури може бути обмеженою. Встановлення точного просторового розташування атомних груп за допомогою ЯМР є складним, а порівняно з методами, такими як SAXS, цей підхід потребує значного часу експериментальної роботи.

Рентгенівська дифракція (XRD). Рентгенівська дифракція є ефективним методом для визначення фазового складу полімерних матеріалів, наявності аморфних ділянок, ступеня кристалічності та мікроструктури кристалічних областей. Принцип методу базується на інтерференції та дифракції рентгенівських променів при взаємодії з кристалічно впорядкованими ділянками матеріалу. Крім того, XRD дозволяє отримати додаткову інформацію, наприклад, про орієнтацію полімерних ланцюгів або наповнювачів у матриці; наприклад, властивості двовісно орієнтованого поліпропілену суттєво відрізняються від матеріалу з іншою орієнтацією.

Рентгенівську дифракцію можна виконувати навіть під час кристалізації зразка, що теоретично дозволяє регулювати параметри обробки для отримання бажаних властивостей. Для досягнення високоякісних результатів аналізу зразок має бути добре орієнтованим і кристалічним. Підготовка полімерних зразків для XRD включає методи сушіння та кондиціонування, наприклад, використання ексикатора для крохмальних плівок і порошків перед проведенням оцінки.

Методи структурної характеристики полімерів, такі як SAXS, ЯМР та рентгенівська дифракція, дозволяють оцінити конформацію, кристалічність, аморфність та мікроструктуру полімерних матеріалів. SAXS ефективний для

аналізу макромолекул у розчинах, ЯМР надає інформацію про локальні рухи та функціональні групи, а XRD визначає фазовий склад і кристалічну організацію. Використання цих методів у комбінації забезпечує всебічну оцінку властивостей полімерів і їхніх структурних особливостей.

8.5. Природні полімери як альтернатива нафтовим матеріалам

Термін «полімер» походить від грецьких слів poly («багато») та meros («частини») і означає молекули, що складаються з численних повторюваних одиниць. Полімери мають високу молярну масу — від десятків до мільйонів дальтонів. Синтетичні полімери, такі як пластмаси, нитки та спеціальні каучуки, становлять приблизно 80% ринку органічних хімікатів.

Полімери утворюються шляхом об'єднання малих молекул — мономерів — у великі молекули. Залежно від способу з'єднання мономерів розрізняють полімери ланцюгового зростання та полімери конденсаційного типу, при утворенні яких часто виділяється невелика молекула, наприклад вода.

Природні полімери широко поширені в живих організмах і включають білки, целюлозу, крохмаль, желатин, хітин та хітозан. Вони можуть бути виділені, очищені та модифіковані для поліпшення властивостей і застосування у різних галузях, включаючи біомедицину, харчову та матеріалознавчу промисловість.

Як альтернативу полімерним матеріалам на нафтовій основі розглядають целюлозу та крохмаль, які мають значний потенціал у різних галузях. Ці матеріали широко розповсюджені у світі та є відновлюваними, оскільки отримуються з природних джерел. Крохмаль характеризується низькою вартістю, доступністю та здатністю до біорозкладання. Целюлоза, завдяки своїй доступності, низькій щільності, біосумісності, термомеханічній стабільності та стійкості, є перспективним матеріалом для застосування у промисловості та біомедицині. Крім того, її природне походження робить целюлозу безпечною для людини та навколишнього середовища.

Таблиця 11 – Порівняння переваг крохмалю та целюлози

Характеристика	Крохмаль	Целюлоза
Походження	Рослинні джерела	Рослинні джерела
Вартість	Низька	Середня
Доступність	Висока	Висока
Біорозкладність	Так	Так
Щільність	Низька	Низька
Термомеханічні властивості	Середні	Високі
Стійкість	Середня	Висока
Безпека для організму	Так	Так
Перспективи промислового застосування	Обмежені порівняно з целюлозою	Високі, широкий спектр застосування

Крохмаль і целюлоза є перспективними природними полімерними матеріалами та ефективною альтернативою нафтовим полімерним продуктам. Крохмаль вирізняється низькою вартістю, високою доступністю та біорозкладністю, тоді як целюлоза додатково має високі термомеханічні властивості, стійкість і широкий спектр промислового застосування. Обидва матеріали безпечні для організму та навколишнього середовища, що робить їх привабливими для використання в біомедицині, харчовій промисловості та матеріалознавстві.

8.6. Екстракція, очищення та модифікація целюлози

Біопродукти на основі натуральної целюлози стикаються з певними труднощами при конкуренції із синтетичними пластиками, незважаючи на швидке розширення ринку біопластиків завдяки численним інноваційним розробкам. До основних викликів належать проблеми масштабування виробництва, висока собівартість та обмежена функціональність целюлозних матеріалів. Щоб конкурувати з синтетичними пластиками, целюлозні матеріали повинні відповідати стандартам ефективності та задовольняти вимоги кінцевого користувача. У цьому контексті модифікація поверхні целюлози дозволяє розширити її сферу застосування, зберігаючи хімічний склад, механічні

властивості та здатність до біологічного розкладання. Багато хімічних методів модифікації були розроблені для максимізації потенціалу целюлози, особливо у специфічних галузях промисловості.

Целюлоза, один із найпоширеніших природних полімерів, зазвичай добувається з рослинної сировини, такої як деревина, бавовна, льон, джут або водорості. Процес її отримання включає кілька ключових етапів:

Екстракція. Сировину подрібнюють і обробляють хімічними реагентами (лужними або кислотними розчинами) для видалення лігніну, геміцелюлоз та інших домішок, залишаючи чисту целюлозу у формі волокон або суспензії.

Очищення. Виділену целюлозу промивають і відбілюють для усунення залишкових барвників, пектинів та смол. На цьому етапі можна отримати як частково очищений матеріал, так і високоочищену целюлозу, придатну для харчової, фармацевтичної та медичної промисловості.

Модифікація. Для поліпшення фізико-хімічних властивостей целюлозу піддають хімічним або фізичним змінам, включаючи ефіризацію, етерифікацію, окислення або наномеханічну обробку. Метою таких модифікацій є підвищення розчинності, термостійкості, біосумісності, адгезії та здатності до формування композитів і плівок.

Модифікована целюлоза знаходить широке застосування у виробництві харчових продуктів, лікарських форм, біоматеріалів, упаковки та високотехнологічних композитів.

8.6.1. Екстракція целюлози

Целюлоза є лінійним полісахаридом, утвореним із повторюваних глюкопіранозильних залишків, з'єднаних між собою 1→4-глікозидними зв'язками. Ці ланцюги формують довгі полімерні волокна, які здатні організовуватися у впорядковані кристалічні та аморфні ділянки. Кристалічна структура целюлози представлена моноклінними паличкоподібними кристалами, де довга вісь b елементарної комірки орієнтована паралельно до напрямку волокон. Глюкопіранозильні ланки в ланцюгах мають гофровану

конфігурацію, що полегшує утворення внутрішньоланцюгових водневих містків між атомами O-4 та O-6, а також між O-3 та O-5. Гідрофобні взаємодії вздовж осі с допомагають стабілізувати структуру, тоді як міжмолекулярні водневі містки вздовж осі а утримують паралельні ланцюги разом, забезпечуючи додаткову механічну стабільність і міцність.

Кристалічні сегменти складають близько 60% від загальної маси целюлози і є основою її фізико-механічних властивостей, таких як висока міцність, термостійкість та здатність до утворення композитів і плівок. Аморфні ділянки, що оточують кристалічні сегменти, мають гелеподібну структуру, яка здатна до часткової кристалізації при видаленні вологи. Ці аморфні області містять кислотно- або лужно-лабільні зв'язки, що легко піддаються гідролізу, утворюючи мікрокристалічну целюлозу з молекулярною масою приблизно 30–50 кДа. Хоча мікрокристалічна целюлоза не зберігає фіброзної структури, вона залишається нерозчинною у воді без спеціальної модифікації, що визначає її обмежену взаємодію в гідрофільних системах.

Структура целюлози визначає її численні фізико-хімічні та функціональні властивості. Кристалічні ділянки забезпечують високу механічну міцність і стабільність до термічних та хімічних впливів, тоді як аморфні сегменти визначають її реакційну здатність та здатність до хімічної і фізичної модифікації. Поєднання кристалічних і аморфних областей дозволяє целюлозі утворювати композити, плівки та гелі, які застосовуються в харчовій, фармацевтичній та медичній промисловості.

Завдяки такій організації молекул, целюлоза демонструє високу біосумісність, стабільність і здатність до біологічного розкладання, що робить її перспективним матеріалом для екологічно чистих технологій і розробки біоматеріалів нового покоління. Крім того, структурна характеристика дозволяє контролювати властивості целюлози через хімічні модифікації, включаючи ефіризацію, етерифікацію, окислення та наномеханічну обробку, розширюючи її функціональні можливості для конкретних застосувань.

8.6.2. Модифікація целюлози

Целюлоза є основним компонентом клітинних стінок усіх рослин і відноситься до складних вуглеводів із кристалічно впорядкованою структурою. На відміну від крохмалю, який складається переважно з α-1,4-глікозидних зв'язків, целюлоза побудована з β-1,4-глікозидних зв'язків, що об'єднують усі молекули глюкози у довгі ланцюги. Основними джерелами сировини для промислового отримання целюлози є бавовняні та деревні волокна. Для розчинення рослинних волокон і отримання целюлозних розчинів, наприклад для виробництва віскози, використовують лужні та сірковуглецеві реагенти. У подальшому з розчину віскози утворюють целюлозу у вигляді плівки або целофану за допомогою кислотного і сульфатного осадження.

Завдяки високій механічній міцності, жорсткості, здатності до біорозкладання та відновлюваності, целюлозні макро- та нановолокна набувають все більшого значення у сучасних матеріалах і композитах. Особливо актуальним є використання целюлозних нановолокон для армування композиційних матеріалів, де вони покращують механічні, термічні та біодеградаційні властивості кінцевого продукту. Оскільки природні целюлозні волокна є гідрофільними, підвищення шорсткості їх поверхні та контроль поверхневої модифікації є критичними для досягнення оптимальної адгезії між волокнами та полімерною матрицею, що дозволяє створювати композити з покращеними експлуатаційними характеристиками.

8.7. Екстракція, очищення та модифікація крохмалю

Крохмаль — це природний полімер широкого призначення, який активно застосовується в різних сферах промисловості: клейовій і палітурній, паперовій, гофровиробництві, будівництві, лакофарбовій, хімічній, фармацевтичній, текстильній, нафтопереробній, а також у харчовій і кормовій галузях. Його характеристики — зокрема температура клейстеризації, здатність зв'язувати воду під час нагрівання, адгезійні властивості, міцність утворених гелів та інші

функціональні показники — значною мірою визначаються походженням сировини.

Оскільки кількість природних джерел крохмалю є обмеженою, важливого поширення набули модифіковані форми. Фізична або хімічна модифікація дає змогу покращити властивості нативного крохмалю, усунути окремі недоліки та суттєво розширити напрями його використання в промисловості, підвищуючи універсальність цього матеріалу як у технічних, так і в харчових продуктах.

Екстракція, очищення та модифікація крохмалю — це послідовні технологічні етапи, спрямовані на отримання крохмалю з рослинної сировини, покращення його чистоти та надання необхідних функціональних властивостей.

Екстракція передбачає виділення крохмалю з рослинних тканин (картоплі, кукурудзи, пшениці тощо) шляхом подрібнення сировини, відмивання та відділення крохмальних гранул від білків, клітковини й інших супутніх компонентів.

Очищення полягає у видаленні домішок — залишків клітинних оболонок, розчинних речовин, пігментів і мікроорганізмів — що забезпечує високу якість та стабільність продукту.

Модифікація крохмалю здійснюється фізичними, хімічними або ферментативними методами з метою зміни його структури та властивостей. Це дозволяє регулювати в’язкість, термостійкість, здатність до гелеутворення, стабільність при заморожуванні-відтаюванні та інші показники, що розширює можливості використання крохмалю в харчовій і технічній промисловості.

8.7.1. Методи екстракції крохмалю

Декілька органів рослин слугують природними депо вуглеводів, де крохмаль накопичується як основна запасна форма. У харчуванні людини він є одним із ключових джерел вуглеводів і входить до складу багатьох продуктів та страв. Окрім харчового значення, крохмаль і продукти його переробки мають важливу роль у промисловості, зокрема в паперовому та текстильному виробництві.

Сировинна база для його отримання зазвичай зосереджена в регіонах спеціалізованого вирощування культур, багатих на крохмаль. Основний обсяг світового виробництва — близько 99% — забезпечують такі культури, як пшениця, кукурудза та картопля (у нативній і модифікованій формах крохмалю). Поряд із цим існують і альтернативні джерела. Зокрема, крохмалі з бобових культур (гороху, сочевиці) останнім часом привертають увагу завдяки своїм властивостям, що дозволяють розглядати їх як перспективну заміну хімічно модифікованим крохмалям у різних видах продукції.

Рисовий крохмаль широко застосовують як інгредієнт у харчових продуктах і різноманітних комерційних виробах. Особливо часто його використовують у десертах і хлібобулочних виробах, що зумовлено його характерними властивостями — дрібними та рівномірними гранулами, світлим кольором і нейтральним запахом.

Водночас білки рису щільно адсорбуються на поверхні крохмальних гранул ендосперму, через що процес відокремлення крохмалю є складнішим і дорожчим порівняно з іншими видами крохмалю. Видалення білка з рисового борошна можливе із застосуванням лужних розчинів, поверхнево-активних речовин або протеолітичних ферментів. На практиці для екстракції білка найчастіше використовують луги, зокрема NaOH, а також ПАР, такі як лаурилсульфат натрію (SLS) і додецилбензолсульфонат (DoBS). Ці реагенти сприяють руйнуванню олігомерних структур білка та переведенню їх у розчинну форму.

Показано, що для виділення рисового крохмалю ефективнішим є водний розчин 1,2% DoBS у поєднанні з 0,12% сульфіту натрію — він перевершує за результатами 0,2% NaOH або 1,2% SLS із тією ж добавкою сульфіту. Ефективність видалення білка може додатково підвищуватися за повторної короткочасної (1–2 години) екстракції зі свіжою порцією розчину.

Підвищення температури процесу лише незначно покращує екстракцію білка, проте суттєво збільшує втрати крохмалю, тому такий підхід вважається недоцільним. Залишковий вміст білка у рисовому крохмалі істотно впливає на

адгезійні властивості крохмальної пасти: зниження кількості білка підвищує в’язкість пасти та зменшує температуру клейстеризації.

8.7.2. Модифікація крохмалю

Фізичні та хімічні методи обробки дозволяють покращувати або «налаштовувати» властивості крохмалю, амілози та амілопектину відповідно до конкретного харчового продукту чи технологічного застосування.

Фізичні процеси, такі як подрібнення гранул або вплив тиску за різного вмісту води, сприяють збільшенню аморфної частини крохмалю. Це підвищує його здатність до диспергування та набухання навіть у холодній воді, знижує температуру клейстеризації на 5–10 °C і робить крохмаль більш чутливим до ферментативного розщеплення. Наприклад, борошно з пошкодженим крохмалем демонструє підвищене водопоглинання та активніше розщеплення амілози у хлібному тісті. Екструдовані крохмалі відрізняються меншою в’язкістю та кращою розчинністю й диспергованістю.

Хімічні зміни крохмалю відбуваються при високих температурах (185–200 °C), що проявляється частковим розпадом амілози при правильному нагріванні. У результаті формуються не тільки мальтоза, а й інші цукри — ізомальтоза, гентіобіоза, софороза та 1,6-ангідроглюкопіраноза, які можуть впливати на солодкість, текстуру та технологічні властивості продукту.

8.8. Біологічне застосування природних полімерів

Природні полімери, такі як крохмаль, целюлоза, пектин, хітозан, альгінати та білкові полімери, відіграють важливу роль у біологічних і медичних застосуваннях завдяки своїй біосумісності, біорозкладності та функціональним властивостям.

Таблиця 12 – Біологічне застосування природних полімерів

Природний полімер	Біологічне застосування	Приклади / Примітки
Крохмаль	Транспорт лікарських засобів, капсулювання, стабілізатори у харчовій промисловості	Контрольоване вивільнення ліків, текстура хлібобулочних виробів, пребіотики
Целюлоза	Біорозкладні пакувальні матеріали, матриці для тканинної інженерії	Біоплівки, носії ферментів, підтримка росту клітин
Пектин	Загусники, гелеутворювачі, капсулювання лікарських засобів	Джеми, желе, покриття таблеток, підтримка кишкової мікрофлори
Хітозан	Регенерація тканин, біоактивні плівки, антибактеріальні покриття	Матриці для імплантатів, лікування ран, носії для ліків
Альгінати	Біоматеріали для тканинної інженерії, матриці для клітин	Гелі для культивування клітин, контрольоване вивільнення ліків
Білкові полімери (колаген, желатин)	Каркаси для росту тканин, капсулювання, харчові продукти	Імплантати, харчові добавки, ферментативні носії

Таким чином, природні полімери демонструють широкий спектр біологічного застосування — від фармацевтики та харчової промисловості до біотехнологій та екологічних рішень — завдяки своїм біосумісним, біорозкладним та функціональним властивостям.

8.8.1. Протизапальна активність

Природні полісахариди активно застосовуються в нанотехнологіях для лікування запальних захворювань завдяки своїм протизапальним властивостям, які широко досліджувалися. Зокрема, деякі полісахариди блокують експресію хемотаксису та факторів адгезії, а також знижують активність ключових ферментів, що беруть участь у запальному процесі. Інші полісахариди

пригнічують медіатори запалення, такі як цитокіни (IL-1β, IL-6, TNF-α) та оксид азоту (NO), а також зменшують інфільтрацію клітин запалення.

Сульфатовані полісахариди з морських водоростей проявляють протизапальну активність, запобігаючи міграції лейкоцитів до уражених ділянок. Завдяки цим терапевтичним властивостям харчові добавки рослинного та тваринного походження активно вивчаються під час розробки нових лікарських засобів. На сьогодні близько 50 % ліків на ринку містять натуральні продукти, їх похідні або біомакромолекули.

Природні добавки цінуються за багатий хімічний склад та меншу ймовірність побічних ефектів порівняно з синтетичними препаратами. Деякі рослини містять речовини, які можуть виступати протизапальними засобами та застосовуватися для лікування остеоартриту. До них належать куркумін, капсаїцин, берберин, синоменін, рапаміцин, кора білої верби та інші природні сполуки, фармакологічна дія яких підтверджена науковими дослідженнями.

Таблиця 13 – Природні полісахариди та їх протизапальні властивості

Полісахарид / Натуральна сполука	**Механізм протизапальної дії**	**Приклади / Джерела**
Полісахариди, що блокують хемотаксис і адгезію	Зменшують міграцію запальних клітин і активність ключових ферментів	Загальні рослинні та тваринні полісахариди
Полісахариди, що пригнічують медіатори запалення	Знижують рівень цитокінів (IL-1β, IL-6, TNF-α) та оксиду азоту (NO), зменшують інфільтрацію клітин	Різні харчові добавки з рослин і тварин
Сульфатовані полісахариди з водоростей	Перешкоджають міграції лейкоцитів до місць запалення	Морські водорості (наприклад, ламінарія, фукус)
Природні сполуки-ліки від остеоартриту	Протизапальна та знеболювальна дія, регуляція запальних процесів	Куркумін (куркума), капсаїцин (перець), берберин, синоменін, рапаміцин, кора білої верби

Природні полісахариди та їх похідні ефективно знижують запальні процеси, регулюючи цитокіни, ферменти та міграцію клітин, і застосовуються у харчових добавках та ліках завдяки високій безпечності та біосумісності.

8.8.2. Антикоагулянтна активність

Сульфатовані полісахариди, зокрема нефракціоновані форми та низькомолекулярні гепарини, широко застосовуються як антикоагулянти для запобігання утворенню тромбів. Проте їх використання може супроводжуватися серйозними побічними ефектами, такими як підвищений ризик кровотеч та тромбоцитопенія. Через це значна увага дослідників зосереджена на вивченні природних альтернатив та оптимізації властивостей полісахаридів для безпечного застосування.

Дослідження показали, що сульфатовані полісахариди, крім антикоагулянтної активності, мають і інші біологічні ефекти, зокрема антиоксидантні властивості, що дозволяють нейтралізувати вільні радикали та зменшувати оксидативний стрес у організмі. Антикоагулянтна активність цих полімерів тісно пов’язана зі ступенем сульфування: чим вища концентрація сульфатних груп, тим ефективніше вони блокують фактори згортання крові.

Особливий інтерес представляють природні полісахариди, отримані з різноманітних морських джерел. Серед них виділяють корали, морські губки, мікроводорості, а також молюсків та панцерних тварин, таких як креветки, краби, омари та раки. Ці природні полісахариди демонструють антикоагулянтну активність і можуть розглядатися як перспективні біоактивні речовини для розробки нових фармацевтичних препаратів із мінімальними побічними ефектами.

Таким чином, сульфатовані природні полісахариди поєднують безпечне походження із значною біологічною активністю, що робить їх привабливими кандидатами для медичного використання в кардіології та гемостазі.

8.8.3. Противірусна активність

Сульфатовані полісахариди, отримані з морських водоростей, відомі здатністю блокувати реплікацію вірусів, що мають оболонку, включно з вірусом простого герпесу, вірусом імунодефіциту людини (HIV), цитомегаловірусом, вірусом денге та респіраторно-синцитіальним вірусом. Цей ефект виявляється ще з 1950-х років, і з того часу дослідження підтвердили ключову роль сульфатованих екзополісахаридів як природних противірусних агентів. Їх синтезують різні види мікроводоростей, і саме структура полісахариду, включно з наявністю сульфатних груп, визначає ефективність блокування вірусної реплікації.

У традиційній китайській медицині полісахариди застосовувалися протягом тривалого часу як природні противірусні засоби. Вони зміцнюють імунну систему організму, стимулюючи активність макрофагів, посилюючи фагоцитарну діяльність та сприяючи вивільненню інтерферонів (IFN) і антитіл. Ці механізми підвищують здатність організму протистояти вірусним інфекціям і сприяють швидшому одужанню.

Крім противірусної дії, біохімічні властивості полісахаридів мікроводоростей включають антиоксидантну та антибактеріальну активність, що робить їх перспективними для широкого застосування — від фармацевтичних препаратів до функціональних харчових продуктів і біологічно активних добавок. Сучасні дослідження також демонструють потенціал цих полісахаридів для створення нових терапевтичних засобів проти вірусних інфекцій, що особливо актуально у контексті поширення вірусних захворювань.

8.9. Застосування природних полімерів у харчових продуктах

Полімери в харчовій та біологічній сфері відрізняються високою складністю, оскільки вони можуть бути розгалуженими, а окремі мономери можуть мати різні фізико-хімічні властивості — наприклад, заряд у поліелектролітів або гідрофобність у амфіпатичних полімерів.

Основними харчовими полімерними компонентами є білки та полісахариди. Серед природних полісахаридів особливе значення мають крохмаль, целюлоза, хітозан, галактоманнани, карагенани, альгінати, агари, інуліни, пектини, ксантани та камеді. Вони поширені в природі, є важливими джерелами живлення і часто використовуються як основний сипучий корм для тварин.

Крім харчової цінності, полісахариди виконують функції харчових добавок, завдяки своїм унікальним властивостям: вони можуть діяти як загущувачі, стабілізатори, гелеутворювачі та емульгатори. Таким чином, природні полімери, включаючи полісахариди (крохмаль, целюлоза), поліаміди (білки) і незначну кількість полінуклеотидів (ДНК та РНК), складають основу більшості продуктів харчування та визначають їхню текстуру, структуру і харчову цінність.

Білки — це лінійні складні гетерополіелектроліти, що складаються з послідовностей до 20 різних амінокислот, які відрізняються зарядом, гідрофобністю та наявністю ароматичних структур. У живих клітинах і тварин білки, що мають середній ступінь полімеризації близько 10^3, виконують різноманітні біологічні функції, включаючи структурну, каталізаторну та транспортну роль.

У харчових продуктах білки присутні у різних формах і служать джерелом амінокислот для підтримки власного метаболізму організму. Вони також володіють унікальними функціональними властивостями: здатністю формувати та стабілізувати емульсії, піни та гелі, підвищувати в’язкість продуктів і утримувати воду.

Попри широке застосування, білки є дорожчими за інші природні полімери, такі як крохмаль і целюлоза, що обмежує їх використання у технічних і промислових цілях. До ключових харчових білків належать желатин, молочні білки, яєчні білки та рослинні білки, які широко застосовуються у виробництві продуктів харчування та біоактивних добавок.

Полісахариди — це гетерополімери цукрів та їхніх похідних, які можуть мати лінійну або розгалужену структуру. Багато з них відносяться до поліелектролітів, що надає їм специфічних властивостей у водних розчинах, таких як здатність до гелеутворення або взаємодії з іонами. Зазвичай полісахариди мають ступінь полімеризації від 10^3 до 10^4, що визначає їх молекулярну масу і функціональні можливості.

Полісахариди виконують важливі поживні функції. Вони служать джерелом енергії для організму: у рослин крохмаль накопичується в запас, а у тварин відповідну роль виконує глікоген. Ці полісахариди легко розщеплюються ферментами під час травлення, забезпечуючи організм глюкозою для метаболічних процесів та підтримки життєдіяльності.

Окрім поживної ролі, полісахариди виконують також структурні функції. Вони служать будівельним матеріалом для клітинних стінок та інших структур. Наприклад, целюлоза формує міцні клітинні стінки у рослин, хітин забезпечує твердий екзоскелет членистоногих і підтримує структуру клітинних стінок грибів. Ці структурні полісахариди мають дуже складну і змішану архітектуру, що надає їм механічну міцність та стійкість до деградації.

Завдяки своїй різноманітності та унікальним властивостям, полісахариди зустрічаються у природі в багатьох формах і відіграють ключову роль як у харчових, так і у технічних та біологічних системах. Вони є універсальними компонентами, що поєднують енергетичну цінність із структурною функцією, забезпечуючи стабільність і життєздатність біологічних організмів.

Крохмаль та білки є одними з найважливіших харчових компонентів, багатих на макроелементи, які забезпечують організм енергією та необхідними амінокислотами. Вони відіграють ключову роль у формуванні структури продуктів, впливають на їх текстуру, в’язкість та здатність до утворення гелів, емульсій і піни.

У цьому розділі акцент буде зроблено на природних полімерах, що використовуються не лише як джерела харчової цінності, а й як харчові добавки та функціональні компоненти. Такі полісахариди та білки застосовуються у

рецептурах продуктів із спеціалізованим призначенням — наприклад, для загущення, стабілізації, гелеутворення, покращення текстури або підвищення водоутримувальної здатності. Вони виконують функції, що виходять за межі базового харчування, надаючи продуктам додаткові технологічні та органолептичні властивості.

Специфічні застосування природних полімерів у харчових продуктах можна розділити на дві основні категорії.

Перша категорія пов'язана зі стабілізацією мікроструктур продуктів. Полісахариди та білки використовуються для гелеутворення, згущення, формування емульсій та піни, що забезпечує необхідну текстуру та стабільність продуктів. Крім того, природні полімери застосовуються як технологічні допоміжні засоби: вони виступають кріопротекторами, підвищуючи стабільність продуктів під час циклів заморожування–розморожування; допоміжними речовинами для сушіння; а також як інкапсуляційні матеріали, що дозволяють зберігати активні інгредієнти та контролювати їх вивільнення.

Друга категорія включає додаткові фізіологічні та біологічні функції, які надають продуктам функціональну цінність. До таких функцій належать зниження рівня холестерину в крові, підвищення відчуття насичення, збільшення біодоступності поживних речовин, а також пригнічення росту шкідливих мікроорганізмів. Завдяки цим властивостям природні полімери активно застосовуються у розробці функціональних харчових продуктів з конкретними заявами про користь для здоров'я.

8.10. Регуляторні аспекти

Природні полімери можуть класифікуватися як харчові добавки або як основні інгредієнти продукту, при цьому більшість з них відноситься до категорії добавок. Наприклад, желатин зазвичай розглядається як інгредієнт. У списку інгредієнтів продукту інгредієнти зазначаються за назвами, тоді як харчові добавки обов'язково позначаються спеціальним ідентифікаційним номером — у

Європейському Союзі це Е-номер, а на міжнародному рівні — INS (International Numbering System). Назва добавки при цьому може бути необов'язковою.

У Сполучених Штатах контроль за харчовими добавками здійснюється відповідно до стандартів JECFA (Об'єднаний комітет експертів ВООЗ з харчових добавок), а в ЄС — Європейською комісією. Законодавче регулювання покликане захищати здоров'я споживачів і забезпечувати етичні норми у виробництві харчових продуктів. Основна мета регулювання полягає у встановленні допустимих меж споживання добавок та критеріїв їхньої чистоти. Після схвалення певної добавки їй присвоюють міжнародний номер (INS або Е-номер) та визначають допустиму добову норму споживання (ADI), що підтверджує безпеку її використання.

В Європейському Союзі Європейське агентство з безпеки продуктів харчування (EFSA) здійснює моніторинг та оцінку заяв про користь для здоров'я природних полімерів, які застосовуються як харчові добавки. EFSA аналізує наявні наукові дані і визначає, чи достатньо доказів для підтвердження конкретної заяви. На упаковці продуктів у ЄС дозволяється рекламувати лише ті твердження про здоров'я, які отримали схвалення EFSA. Заявки на додаткові твердження часто відхиляються через недостатність або неякісність досліджень, а також через невелику кількість випробуваних у цих дослідженнях. Проте значна кількість природних полімерів пройшла оцінку EFSA і отримала схвалення для використання їхніх заяв про користь для здоров'я.

8.11. Фармацевтичне застосування природних полімерів

Природні полімери знаходять широке застосування як у полімерній, так і у фармацевтичній промисловості. Через різноманіття та складність фармацевтичного сектору існує постійна потреба у вивченні різних способів їх використання. Тому знання про роль природних полімерів у фармацевтичній сфері може бути корисним для полімерного бізнесу, оскільки це дозволяє оцінити потенціал їхнього широкого застосування та врахувати ключові вимоги

для реалізації кінцевих продуктів, наприклад забезпечення певних функціональних властивостей.

У фармацевтичній промисловості полімери здебільшого застосовуються у системах доставки лікарських засобів, де вони виконують роль допоміжних речовин, матриць або контролюючих агентів. У наступному розділі цієї глави детально розглядаються шляхи надходження лікарських речовин в організм та наводиться схема потенційних застосувань природних полімерів у фармацевтичних продуктах.

8.11.1. Трансдермальна доставка ліків

Полімери займають провідну позицію серед матеріалів, що використовуються для трансдермальної доставки ліків (ТДД), завдяки своїм унікальним властивостям, які сприяють ефективності цього процесу. Вони здатні контролювати вивільнення лікарських речовин із носіїв-композицій, забезпечуючи точне дозування і стабільність терапевтичного ефекту. До найбільш поширених полімерів у ТДД належать силікони, полівініловий спирт, хітозан, поліакрилати, поліефіри та різні похідні целюлози.

Природні полімери є особливо привабливими для ТДД, оскільки вони доступні, економічні, біосумісні та потенційно піддаються біологічному розкладанню. Крім того, вони легко піддаються хімічним і поверхневим модифікаціям для задоволення специфічних вимог систем доставки. Системи ТДД зазвичай поєднують один або кілька полімерів з вбудованим лікарським засобом, забезпечуючи контрольовану і тривалу доставку активних речовин через шкіру.

Високі стандарти фармацевтичної продукції визначають вимоги до хімічної інертності та чистоти полімерів, які використовуються в ТДД. Крім того, матеріали повинні володіти відповідними фізичними властивостями, бути технологічно придатними до обробки і не піддаватися псуванню. Оскільки трансдермальні пластирі контактують зі шкірою людини протягом тривалого

часу, ключовими факторами при розробці таких систем є біорозкладність та безпека матеріалів.

8.11.2. Природні полімерні імплантати

Використання природних полімерів у виготовленні імплантатів є особливо перспективним завдяки їхнім унікальним властивостям, які роблять їх придатними для різноманітних біомедичних застосувань. Як і в інших медичних системах, ключовими перевагами природних полімерів є їхня біосумісність, доступність та здатність до контрольованого розкладу. Оскільки імплантати інтегруються безпосередньо в тканини організму на тривалий період, матеріали повинні зберігати стабільність і функціональність протягом усього терміну використання, забезпечуючи необхідні механічні, хімічні та біологічні характеристики.

Особлива увага приділяється процесу розкладу полімерів у живому організмі. Ідеальні природні полімери повинні розпадатися на нетоксичні, біосумісні продукти, які легко виводяться природними шляхами без негативного впливу на організм. Це дозволяє не лише уникнути хронічного запалення чи імунної реакції, але й забезпечує довготривалу ефективність імплантату, якщо він виконує функцію доставки ліків, структурної підтримки або регенерації тканин.

Крім того, природні полімери часто можна модифікувати хімічно або фізично, щоб підлаштувати їх під специфічні потреби імплантату — наприклад, регулювати швидкість розкладу, покращити міцність або підвищити взаємодію з певними клітинами чи тканинами. Це робить їх універсальним матеріалом для широкого спектру імплантаційних систем — від тимчасових скелетних матриць і систем доставки лікарських засобів до тривалих біоактивних імплантатів, що сприяють відновленню тканин.

Таким чином, природні полімери поєднують у собі необхідні біологічні, хімічні та фізичні властивості, що робить їх ідеальним вибором для створення безпечних, ефективних та функціональних імплантатів, які можуть

інтегруватися з організмом людини і виконувати свої завдання протягом тривалого часу без ризику токсичних ефектів.

8.12. Вплив природних полімерів на навколишнє середовище

Термін «натуральний» не слід ототожнювати з «зеленим». Природні полімери, які часто називають біополімерами, — це речовини, що виробляються живими організмами, такими як рослини, тварини або мікроорганізми. До них належать, наприклад, целюлоза, шовк, хітин, білки та ДНК. Деякі природні полімери можуть також синтетично отримуватися з природної сировини у промислових масштабах. Біополімери та полімери на біологічній основі є важливою складовою сучасної біоекономіки. Так, у 2019 році їх загальний обсяг виробництва досяг 3,8 мільйонів тон, що становило близько 1% від світового виробництва нафтохімічних полімерів (без урахування натурального каучуку та целюлозних волокон). Очікується, що попит на природні полімери в США щорічно зростатиме приблизно на 6,9%.

Термін «зелена хімія», який з'явився у 1990-х роках, стосується виробництва екологічно чистих полімерів та інших хімічних продуктів і також відомий як стійка або екологічна хімія. Міжнародний союз теоретичної та прикладної хімії (IUPAC) визначає «зелену хімію» як розробку хімічних продуктів і процесів, які зменшують або усувають використання та утворення речовин, шкідливих для людей, тварин, рослин і навколишнього середовища.

Концепція використання біологічної сировини в хімічній промисловості не є новою — принаймні з початку XXI століття біополімери довели своє широке застосування в промислових процесах. Проте тривалий час продукція на біологічній основі не була пріоритетною через низьку вартість нафти та швидке розширення нафтохімічного виробництва. Згодом обмежена доступність викопних ресурсів, екологічні проблеми та технологічний прогрес стали ключовими факторами, які стимулювали розвиток полімерів на біологічній основі.

Історично хімічна промисловість на основі викопного палива розвивалася понад століття, і лише з кінця 1990-х років сектор біологічних полімерів почав активно наздоганяти традиційну нафтохімію. Сьогодні завдяки досягненням біотехнології, включно з білою біотехнологією, виробництво полімерів та інших хімічних речовин з відновлюваних ресурсів стало можливим у промислових масштабах.

Технології першого покоління зазвичай використовували харчові ресурси, такі як кукурудза, крохмаль і рис, для синтезу біополімерів. У міру загострення проблеми «їжа проти палива» виробники почали зосереджуватися на сировині на основі целюлози — відходах харчової, деревної та паперової промисловості, а також стеблах, листі і твердих побутових відходах. Сучасні розробки спрямовані на максимальне використання цих потоків та створення нових технологій для отримання біополімерів, однак повне впровадження різноманітних хімічних речовин з цих джерел може зайняти кілька десятиліть.

Вивчення мотивів розвитку сектору зелених та відновлюваних полімерів потребує детального аналізу, оскільки цей сегмент ринку продовжує зростати. Попит на зелені полімери неможливо зупинити: на рубежі століть відновлювані полімери переживають справжній ренесанс, стимулюючи розвиток макромолекулярних матеріалів, що виготовляються з біологічних джерел, та сприяючи переходу хімічної промисловості до більш стійких і екологічно безпечних технологій.

8.13. Перехід від нафтохімії до біоекономіки

Перехід від нафтохімії до біоекономіки стає дедалі більш актуальним у сучасних економічних і екологічних умовах. Обмежені запаси нафти призводять до прогнозованого підвищення її ціни, особливо на тлі зростання глобального споживання енергії. Однією з ключових причин цього зростання є стрімке збільшення чисельності населення Землі, що прямо впливає на енергетичний попит і потребу у нафтохімічній продукції.

Цінова доступність та конкурентоспроможність пластикових матеріалів залишаються важливими факторами для економіки та промисловості. Перехід на альтернативні невідновлювані ресурси, наприклад вугілля, міг би забезпечити певний рівень стабільності виробництва пластмас і знизити ризики, пов'язані з дефіцитом нафти у майбутньому.

Поряд з економічними факторами, зростає і соціально-екологічний тиск на виробництво. Потреба в екологічно чистих і «зелених» продуктах стає особливо важливою через глобальні занепокоєння щодо зміни клімату та підвищення середньої температури планети. Розробка продукції з низьким вуглецевим слідом отримує додатковий стимул завдяки посиленню екологічних законів та нормативних вимог у багатьох країнах світу.

Таким чином, економічні чинники, енергетична безпека та екологічна відповідальність одночасно підштовхують нафтохімічну промисловість до розвитку біоекономіки та широкого впровадження відновлюваних і «зелених» матеріалів.

Практики екологічного виробництва полімерів передбачають застосування методів та підходів, спрямованих на мінімізацію впливу на довкілля та підвищення стійкості виробництва. До основних принципів відносяться:

1) Використання високого відсотка сировини в кінцевому продукті, що підвищує ефективність ресурсів.
2) Застосування чистих, безвідходних та ефективних технологічних процесів.
3) Зменшення викидів парникових газів та інших забруднюючих речовин.
4) Уникання використання додаткових хімічних реагентів, зокрема органічних розчинників, що можуть шкодити навколишньому середовищу.
5) Підвищення енергоефективності виробництва для зменшення витрат енергії та зниження вуглецевого сліду.
6) Максимізація вмісту сировини у продукті, що сприяє більшій екологічності та стійкості матеріалів.

Такі підходи забезпечують виробництво полімерів із зменшеним екологічним навантаженням і відповідають сучасним стандартам «зеленої хімії».

8.14. Відновлювані полімери

Для створення стійких і екологічно чистих полімерів часто використовують полімеризацію природних біополімерів або біомономерів. Сировина такого типу дозволяє отримувати матеріали, які поєднують функціональні властивості з біосумісністю та потенційною біорозкладністю. Приклади природних біоматеріалів, які можуть піддаватися хімічній модифікації для виробництва полімерів, включають білки, терпени, полісахариди та поліефіри. Хімічна модифікація цих сполук дозволяє поліпшити їхні механічні, термічні та фізико-хімічні властивості, а також адаптувати полімери до конкретних промислових або біомедичних застосувань.

Крохмаль і целюлоза є одними з найпоширеніших біополімерів у нехарчовій промисловості завдяки їхній доступності та економічній ефективності. Водночас значні наукові та комерційні успіхи були досягнуті завдяки активним дослідженням з використання біологічно джерельних мономерів як будівельних блоків для синтезу полімерів або як джерел вуглецю для отримання біологічно розкладаних матеріалів через процес ферментації.

Наприклад, молочна кислота є мономером, який можна полімеризувати у полі(молочну кислоту) за допомогою бактеріальної ферментації крохмалю. Аналогічним чином різні поліефіри та поліаміди можуть бути синтезовані з янтарної кислоти, що утворюється в процесі бродіння, яка використовується як мономер або сополімер.

Ще одним напрямом використання біоресурсних полімерів є кополімеризація або полімеризація жирних кислот, отриманих із ліпідів. Такий підхід дозволяє створювати полімери з різноманітними фізико-хімічними властивостями, придатними для широкого спектра застосувань у промисловості та біомедицині.

Для створення похідних целюлози та крохмалю з певними функціональними властивостями, які відповідають вимогам різних застосувань, гідроксильні функціональні групи в цих полімерних ланцюгах можуть частково або повністю піддаватися етерифікації або нітруванню. Останнім часом великий

інтерес викликає кислотний гідроліз, оскільки він дозволяє виділяти кристалічні компоненти целюлози для використання в матеріалах, створюючи більш доступні та ефективні методи виробництва.

Крохмаль є напівкристалічним полімером, що складається приблизно з 1 000–2 000 000 мономерів глюкози, з'єднаних α-1,4-глікозидними зв'язками. Кожен блок глюкози в ланцюзі крохмалю має три реакційно здатні гідроксильні групи — дві вторинні та одну первинну. Саме ці гідроксильні групи служать ключовими точками для хімічної модифікації, дозволяючи створювати похідні полімерів із заданими фізико-хімічними та функціональними властивостями для різноманітних промислових та біомедичних застосувань.

8.15. Полімолочна кислота

Хоча полімолочну кислоту (PLA) відкрили ще в 1845 році, її комерційне виробництво почалося лише на початку 1990-х років. PLA належить до сімейства аліфатичних поліефірів, а його основним мономером є молочна кислота. Гідроксилкарбонова кислота, яка є мономером молочної кислоти, виробляється бактеріями шляхом ферментації кукурудзяного крохмалю або цукрів, отриманих із відновлюваних джерел. Кукурудза особливо цінна як сировина для бродіння, оскільки забезпечує високу чистоту молочної кислоти, необхідну для ефективного синтезу PLA, хоча можливе використання й інших відновлюваних ресурсів.

Залежно від обраного мікроорганізму, ферментація призводить до утворення L- або D-ізомеру молочної кислоти. PLA користується високим комерційним попитом через свої фізико-хімічні властивості, які роблять його подібним до деяких вуглеводневих полімерів, таких як поліетилентерефталат, у певних аспектах. До його ключових переваг належать висока жорсткість, прозорість, глянцевий блиск і здатність витримувати різноманітні умови обробки.

Легкість обробки розплавом дозволяє синтезувати волокна PLA, які дедалі частіше застосовуються в текстильній промисловості, включно з меблевими

тканинами, шторами, м'якими нетканими дитячими серветками та міцними ландшафтними матеріалами. Такі волокна часто перевершують традиційні синтетичні тканини за певними експлуатаційними характеристиками.

У біомедицині PLA також знайшов широке застосування. Біорозсмоктуючі каркаси для росту клітин і тканин виготовляються з PLA та його композицій, а полімери на основі PLA використовуються для виготовлення шин для підтримки кісток. Крім того, PLA схвалений FDA для кількох клінічних випробувань на людях, що підтверджує його безпечність і придатність для медичних застосувань.

8.16. Біо-поліетилен

Поліетилен (PE) є одним із ключових технологічних полімерів, який традиційно вироблявся з викопних ресурсів. Синтез PE здійснюється шляхом полімеризації етилену під впливом тиску, високої температури та каталізатора. Етилен зазвичай отримують через паровий крекінг нафти або інших важких нафтопродуктів, а також шляхом дегідратації етанолу.

Сучасні технології дозволяють виготовляти так званий мікробний або «зелений» PE з етанолу, отриманого в результаті мікробної ферментації. Ідея виробництва PE з біоетанолу не є новою: компанія Braskem експериментувала з виробництвом біо-ПЕ та біо-ПВХ із біоетанолу ще в 1980-х роках. Проте в той час цей підхід був економічно непривабливим через низькі ціни на нафту та обмежені технологічні можливості біотехнології.

Сьогодні біо-ПЕ виробляють у промислових масштабах з використанням біоетанолу, отриманого з цукрової тростини. За допомогою спеціальних мікробних штамів і процесів ферментації біоетанол можна також виробляти з інших відновлюваних ресурсів, таких як цукровий буряк, крохмальні культури (кукурудза, пшениця), деревина та рослинні відходи. Зазвичай сік цукрової тростини, що містить високу концентрацію сахарози, піддають анаеробній ферментації для отримання етанолу.

Для подальшого перетворення етанолу на етилен його дистилюють для видалення води, утворюючи азеотропну суміш з високим вмістом етанолу. Остаточне зневоднення етанолу здійснюють при високих температурах у присутності твердого каталізатора, після чого отриманий етилен полімеризують для виробництва поліетилену. Такий підхід дозволяє створювати «зелений» PE з відновлюваної сировини, зменшуючи залежність від нафтових ресурсів і покращуючи екологічні показники виробництва.

8.17. Альгінати

Альгінати є природними полімерними сполуками, що здобуваються з бурих водоростей, і широко використовуються в промисловості завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям. Вони виконують функції згущувачів, стабілізаторів, а також агентів, здатних утворювати гелі, плівки та водозв'язуючі полімери. Це робить альгінати універсальними для застосування у харчовій промисловості, текстильній промисловості, виробництві кераміки та навіть у системах очищення води.

Властивості альгінатів забезпечують їх здатність легко розчинятися в холодній воді та формувати термостабільні гелі при додаванні іонів кальцію чи інших багатовалентних катіонів. Завдяки цьому їх широко застосовують у харчовій промисловості для створення продуктів із особливою текстурою: наприклад, у приготуванні заварних кремів, реструктуризованої їжі, десертів із гелевою структурою та харчових наповнювачів.

Крім того, альгінати використовують як стабілізатори і загусники у напоях, морозиві, емульсіях, соусах та різноманітних готових харчових продуктах. Вони допомагають зберігати однорідність суміші, запобігають розшаруванню інгредієнтів і покращують органолептичні властивості продукту, зокрема текстуру та смак.

Позахарчова промислова сфера також активно використовує альгінати. У текстильній промисловості їх застосовують для друку на тканинах і обробки волокон, у керамічній промисловості — як гелеві добавки для формування форм,

у виробництві зварювальних стрижнів — як стабілізуючі компоненти, а в системах очищення води альгінати виступають як агенти для видалення металів і інших домішок завдяки здатності утворювати гелі та зв'язувати воду.

Завдяки своїй біосумісності та нетоксичності альгінати також використовуються у фармацевтичній та медичній промисловості, наприклад для виготовлення гелів, пов'язок, капсул для доставки ліків та тканинних каркасів. Це робить їх одним із ключових природних полімерів із широким спектром застосувань у сучасній промисловості.

8.18. Економічний вплив природних полімерів

Природний позаклітинний матрикс організму людини та тварин переважно складається з природних полімерів, таких як колаген, еластин і фібриноген, які забезпечують структурну підтримку, еластичність і функціональність тканин. Завдяки своїм біологічним властивостям, подібні матеріали знайшли широке застосування у фармацевтичній та медичній промисловості.

У виробництві лікарських засобів ефективно використовуються різні природні матеріали, включно з білками, ферментами, м'язовими волокнами, полісахаридами та клейкими ексудатами рослинного походження. До найбільш відомих природних полімерів, які застосовуються у фармацевтичній промисловості та суміжних галузях, належать хітозан, карагенан, іспагула, акація, агар, желатин, шелак, гуарова камедь і камедь карайя.

Ці полімери широко використовуються як емульгатори, ад'юванти, стабілізатори та клеї для упаковки. Крім того, вони добре підходять для виробництва фармацевтичної продукції, включаючи таблетки, капсули та гелі, а також косметичних засобів — кремів, лосьйонів і бальзамів. Їхня популярність обумовлена не лише безпечністю та біосумісністю, а й можливістю контролювати фізико-хімічні властивості продукту, такі як в'язкість, здатність утворювати гелі та стабільність емульсій.

Таким чином, природні полімери відіграють ключову роль у сучасних фармацевтичних та косметичних технологіях, забезпечуючи поєднання функціональності, безпеки та стійкості продуктів.

Забруднення навколишнього середовища синтетичними полімерними матеріалами досягло критичних масштабів, особливо у країнах, що розвиваються. Пластмаси, виготовлені на основі нафти, характеризуються високою стабільністю та не піддаються легкому розкладанню мікроорганізмами, що призводить до їх накопичення в ґрунті, воді та морських екосистемах. Крім того, у останні роки спостерігається значне зростання цін на нафту, що ще більше підвищує економічну й екологічну актуальність пошуку альтернативних матеріалів.

Ці фактори пробудили інтерес до біорозкладаних полімерів, перші з яких з'явилися ще у 1980-х роках. За останні два десятиліття попит на полімери, виготовлені з відновлюваних ресурсів, істотно зріс. Основними чинниками цього зростання є екологічна свідомість, зокрема занепокоєння щодо накопичення пластикових відходів, та усвідомлення обмеженості запасів нафти.

Біорозкладні пластмаси можна створювати як із синтетичних, так і з природних полімерів. Природні полімери мають перевагу у вигляді доступності та відновлюваності сировини, тоді як синтетичні полімери зазвичай виробляються з невідновлюваних нафтових ресурсів. Біорозкладання полімерів відбувається завдяки розщепленню гідролітично або ферментативно чутливих зв'язків у полімерних матеріалах, що приводить до утворення простих, нетоксичних сполук, які можна безпечно інтегрувати в навколишнє середовище.

Сучасні дослідження спрямовані на розробку різноманітних біорозкладних полімерів, а також на вивчення мікроорганізмів і ферментів, здатних ефективно їх розщеплювати. Такий підхід забезпечує не лише екологічну безпеку, а й створює можливість заміни традиційних нафтохімічних пластмас стійкими матеріалами, виробленими з відновлюваної сировини.

За даними досліджень, Сполучені Штати займають провідну позицію на світовому ринку природних полімерів, тоді як Африка значно відстає,

незважаючи на загальносвітові тенденції зростання виробництва природних полімерів і розширення ринків у Латинській Америці, Європі та Азії. Протягом кількох десятиліть поява синтетичних замінників бавовни та натурального каучуку знизила торговельні надходження для країн, що розвиваються, і обмежила їхні порівняльні переваги у глобальній промисловості.

Розвиток сектору природних полімерів мав значний вплив на науково-технічні та технологічні галузі, включаючи сільське господарство, медицину, фармацевтику та пакувальну промисловість. Це також позначилося на економіці різних країн, особливо західних, завдяки широкому застосуванню передових матеріалів у харчовій промисловості, виробництві напоїв, засобах охорони здоров'я та продуктах особистої гігієни. Високий попит на природні полімери стимулює інновації у виробництві, вдосконалює технології екстракції та обробки сировини, а також сприяє розвитку більш стійких і екологічно безпечних матеріалів.

8.19. Деякі важливі природні полімери для економіки

Біорозкладані полімери можна класифікувати за різними критеріями, включаючи хімічну структуру, джерело походження та метод синтезу, технології обробки, економічну значущість і сфери використання. Залежно від джерела сировини, їх поділяють на дві основні групи: природні полімери, які отримують із відновлюваних природних ресурсів, та синтетичні полімери, що виробляються з нафти або інших невідновлюваних ресурсів.

На світовому ринку природних полімерів домінують Китай, США та Швеція, на частку яких припадало майже 56% глобального обсягу продажів. Якщо додати експорт Італії, Франції, Німеччини та Нідерландів, сукупна частка цих семи країн перевищує 80% світового ринку. Аналіз динаміки експорту природних полімерів у 2018–2019 роках показав, що багато країн, що розвиваються, а також країни з перехідною економікою, продемонстрували винятково високі темпи зростання експорту. Серед них – Маврикій, Азербайджан, Еквадор, Кіпр, Намібія та Грузія. Таке зростання можна пояснити

тим, що багатонаціональні компанії розташували свої виробничі потужності в цих країнах, що стимулювало розвиток локального виробництва та експорту природних полімерів.

Європейський Союз (27 країн) у 2019 році займав понад половину (більше 50%) світового ринку природних полімерів, що підтверджує його провідну роль у цій галузі. Лідерами серед експортерів у межах ЄС були Швеція, Франція та Італія, на які припадало 31,3% загального експорту. Далі за обсягами йшли Німеччина, Нідерланди, Іспанія, Данія, Чехія, Бельгія, Польща та Ірландія, які разом формували значну частку експорту природних полімерів у Європі.

Ця структура ринку підкреслює глобальне значення природних полімерів як стратегічної сировини, а також вплив багатонаціональних корпорацій на розвиток виробництва та торгівлі у країнах з різним економічним рівнем. Водночас вона демонструє тенденцію до концентрації ринку у декількох економічно сильних країнах, що формує глобальні ланцюги постачання та стимулює інновації у виробництві та застосуванні природних полімерів.

8.20. Промислове використання природних біорозкладаних полімерів

Біополімери, або природні полімери, представляють собою полімери, які природним чином утворюються на всіх стадіях розвитку живих організмів. В основі їх синтезу лежать активовані мономери, що формуються всередині клітин завдяки складним метаболічним процесам. Ці мономери зазвичай беруть участь у реакціях полімеризації росту ланцюга, що каталізуються ферментами, утворюючи високополімерні структури з визначеними фізико-хімічними властивостями.

Біополімери застосовуються у широкому спектрі промислових та побутових продуктів, включаючи пакувальні матеріали (наприклад, поліетиленові пакети), автомобільні компоненти та медичні вироби, зокрема імплантати та системи доставки ліків. Однією з головних переваг використання біорозкладних полімерів є їх екологічна безпека: після завершення терміну

служби матеріали можна компостувати разом із органічними відходами або використовувати для виробництва біомаси.

Крім того, біополімери можна переробляти за допомогою мікробів, що дозволяє отримувати цінні мономери та олігомери. Ці сполуки потім можуть бути використані для створення нових продуктів, зберігаючи замкнений цикл матеріалів і зменшуючи залежність від невідновлюваних ресурсів. Завдяки таким властивостям біополімери стають ключовим елементом у розвитку стійких технологій та економіки замкненого циклу.

Автомобільна промисловість є однією з ключових сфер, де використання біополімерних матеріалів може забезпечити значний економічний ефект. Традиційні матеріали, такі як скловолокно, часто застосовуються для армування компонентів, але вони є абразивними і швидко зношують обробне обладнання, що підвищує витрати на його заміну та технічне обслуговування.

На відміну від цього, натуральні волокна, наприклад льняні, мають більш гладку структуру, що дозволяє продовжити термін служби обладнання та зменшити витрати на виробництво. Крім того, натуральні волокна є більш доступними та менш дорогими порівняно з синтетичними матеріалами, що робить їх економічно вигідним вибором для масового виробництва автомобільних деталей.

Особливо перспективною є тенденція, що спостерігається у сільському господарстві Канади, — зростання використання льняного волокна в автомобільних компонентах. Це не лише сприяє диверсифікації продукції сільськогосподарських господарств, а й стимулює розвиток екологічно чистих матеріалів у промисловості, зменшуючи залежність від невідновлюваних синтетичних ресурсів і підвищуючи стійкість виробничих процесів.

Транспортні піддони були посилені за допомогою китайського очеретяного волокна, що є альтернативним видом армування натуральними волокнами. Використання очерету як матеріалу для піддонів виявилося економічно обґрунтованим рішенням, оскільки такі піддони потребують менше ресурсів і часу для окупності порівняно з традиційними дерев’яними чи

пластиковими піддонами, водночас забезпечуючи аналогічну механічну стабільність і довговічність.

Китайські очеретяні піддони також демонструють підвищену рентабельність у логістичному ланцюгу, оскільки їхня менша маса знижує витрати палива на транспортування, сприяючи одночасно економії ресурсів та зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище. Завдяки цим властивостям очеретяні піддони стають перспективним прикладом застосування біополімерних або натуральних волокон у промислових матеріалах, поєднуючи економічну ефективність із екологічною стійкістю.

Сектор біополімерів перебуває на стадії активного розвитку, проте незабаром він може стати повністю конкурентоспроможним із традиційною індустрією пластмас за вартістю продукції. На сьогодні біополімери виготовляються переважно у невеликих обсягах, тоді як синтетичні пластики виробляються у масштабах масового виробництва, що забезпечує їм економію за рахунок ефекту масштабу.

Проте наявність дешевої та відновлюваної сировини відкриває значні перспективи для масштабування виробництва біополімерів. Дослідники та представники бізнесу заохочуються інвестувати час і ресурси у вдосконалення технологій синтезу, оптимізацію виробничих процесів та розробку ефективних методів переробки, оскільки це дозволить значно знизити виробничі витрати та підвищити конкурентоспроможність біополімерів на глобальному ринку.

Водночас розширення виробництва біополімерів сприятиме розвитку стійких і екологічно безпечних матеріалів, що відповідають сучасним вимогам до зменшення впливу промисловості на навколишнє середовище та скорочення залежності від невідновлюваних нафтових ресурсів.

8.21. Майбутні перспективи

Завдяки своїм унікальним фізико-хімічним, біологічним та деструктивним властивостям біорозкладні полімери є особливо привабливими матеріалами для біомедичних застосувань. Вони не лише сприяють зменшенню викидів

парникових газів і зниженню залежності від викопного палива, але й забезпечують можливість створення безпечних, біосумісних та функціональних матеріалів для організму.

На сьогодні біополімери виробляються і використовуються у невеликих обсягах по всьому світу, а основними напрямками їх застосування залишаються упаковка харчових продуктів та виробництво біопластиків. Проте потенціал цих матеріалів значно ширший: вони можуть стати ключовими компонентами медичних пристроїв, носіїв ліків та біоімплантів, що забезпечують контрольоване вивільнення лікарських речовин і тривалу функціональність у живому організмі.

Для подальшого вдосконалення біополімерів необхідно проводити детальні дослідження взаємодії різних типів полімерів, а також їх впливу на хімічні та фізичні властивості біоматеріалів. Оптимізація цих властивостей дозволить створювати полімери з підвищеною стабільністю, міцністю, біорозкладністю та безпекою для організму.

Подальший розвиток носіїв ліків і біоімплантів на основі біополімерів обіцяє значний позитивний вплив на медичний сектор. Йдеться не лише про покращення клінічних результатів і підвищення ефективності лікування, а й про потенційну революцію у фінансовій стабільності медичних імплантатів, завдяки зменшенню виробничих витрат та підвищенню тривалості їх експлуатації.

8.21.1. Природні полімерні основи для харчових продуктів

Поліізопрени широко використовувалися у харчовій промисловості, зокрема для виробництва жувальної гумки. Спочатку жувальні гумки виготовлялися з природних полімерів, таких як гута-каучук і чикл — натуральні гумки, що зустрічаються в природі. Такі матеріали забезпечували необхідну еластичність і жувальні властивості, проте вони мали обмеження у масовому виробництві та стандартизації характеристик продукту.

Зі зростанням складності ринку та попиту на жувальні гумки виробники почали активно використовувати синтетичні полімери, такі як поліетилен,

полівінілацетат, сополімери стиролу та бутадієну, а також сополімери ізобутилену та ізопрену. Синтетичні полімери дозволяють досягати бажаних фізико-хімічних властивостей продукту, стабільності та однорідності маси гумки, що важливо для масштабного виробництва.

Раніше натуральний гваюлевий каучук поєднували з полівінілацетатом, гідрогенізованою рослинною олією, емульгаторами, пластифікаторами, розчинниками та неорганічними наповнювачами для виготовлення жувальної гумки на основі природних полімерів. Сучасні жувальні гумки переважно виготовляються зі синтетичних полімерів, які, однак, є гідрофобними, що спричиняє прилипання гумки до різних поверхонь.

Натуральні полімери, на відміну від синтетичних, мають більшу гідрофільність, що дозволяє створювати антипригарні жувальні гумки та зменшувати проблеми з налипанням продукту. Крім того, використання жувальних гумок на основі натуральних полімерів потенційно знижує ризики для здоров'я у разі випадкового або навмисного проковтування, оскільки природні матеріали легше перетравлюються або виводяться з організму.

Однак природні полімери, такі як поліізопрен, можуть містити транс- і цис-ізомерні форми, а також білкові залишки, які іноді викликають алергічні реакції. Для зменшення цього ризику технології обробки натуральних полімерів були значно вдосконалені, що дозволяє отримувати більш безпечні та гіпоалергенні харчові продукти. Завдяки цьому очікується збільшення використання жувальної гумки та інших харчових продуктів на основі натуральних полімерів у майбутньому.

8.21.2. Тенденції та перспективи розвитку натуральних полімерів у косметичній промисловості

Біополімери, або природні полімери, — це макромолекули, що утворюються природним шляхом на всіх стадіях розвитку живих організмів. Вони зазвичай синтезуються всередині клітин через складні метаболічні процеси, у яких утворюються активовані мономери — реакційно здатні

молекули, готові до полімеризації. Ці мономери згодом за допомогою ферментів беруть участь у реакціях росту ланцюга, утворюючи довгі полімерні структури. Такий біосинтетичний механізм дозволяє отримувати макромолекули з високою специфічністю та складною архітектурою, що забезпечує їхню функціональність у біологічних системах.

Біополімери відіграють ключову роль у формуванні структур клітин, тканин і позаклітинного матриксу, а також можуть використовуватися для створення різноманітних матеріалів у промисловості та медицині завдяки своїй біосумісності та здатності до біорозкладання.

Існує безліч прикладів використання полімерних сполук у різних сферах, однак через високу економічну конкуренцію наукові дослідження фізико-хімічних та сенсорних властивостей цих матеріалів залишалися обмеженими. Проте деякі вчені зосередили увагу на вивченні зв'язків між реологічними характеристиками полімерів і їхньою функціональністю, зокрема між ксантановою камеддю (XG) та гідроксипропілгуаром (HPG).

Досліджували здатність цих полімерів формувати нитки та розтягуватися як у чистих, так і в змішаних водних розчинах, а також у косметичних емульсіях. Було виявлено, що реологічні властивості XG і HPG значно відрізняються у чистих розчинах. При концентраціях нижче 1% мас./мас. розчини XG демонстрували вищу розтяжність нитки порівняно з HPG. Однак при підвищених концентраціях обох полімерів здатність до розтягування вирівнювалася, і характеристики нитки ставали порівнянними.

Особливо цікавим виявився синергічний ефект змішаних розчинів XG і HPG. У співвідношенні 25/75 було відзначено значне підвищення розтяжності ниток незалежно від загальної концентрації полімерів у досліджуваних розчинах, навіть при концентраціях нижче 0,5% мас./мас. Це свідчить про потенціал комбінацій цих полімерів для створення продуктів із покращеними текстурними та реологічними властивостями, що може бути важливим для харчової, косметичної та фармацевтичної промисловості.

Вплив синергії між ксантановою камеддю (XG) та гідроксипропілгуаром (HPG) на характеристики розтягування заслуговує особливої уваги. Дослідження показують, що взаємодія між цими двома полісахаридами значно підвищує максимальну довжину нитки у змішаних розчинах, що свідчить про синергічний ефект у їхніх реологічних властивостях. Такий ефект дозволяє оптимізувати текстурні характеристики полімерних композицій, що є важливим для різних промислових застосувань, зокрема у харчовій, косметичній та фармацевтичній сферах.

Крім того, полісахариди мають додаткову перевагу завдяки своїй структурній подібності до природних біологічних макромолекул, таких як позаклітинний матрикс (ECM). Це забезпечує підвищений потенціал їх використання у клітинних терапевтичних підходах та тканинній інженерії, оскільки вони можуть сприяти підтримці клітинного росту, адгезії та диференціації. Синергічне поєднання XG і HPG може слугувати основою для створення біосумісних матеріалів із заданими механічними і біологічними властивостями, відкриваючи нові перспективи у розробці носіїв для клітинної терапії та регенеративної медицини.

В останні роки спостерігається значне зростання інтересу до використання полісахаридних матеріалів у тканинній інженерії та біофармацевтиці. Полісахариди, отримані з грибів, такі як хізофіллан, лентинан, гріфолан, полісахарид-пептидний комплекс (PSP) та полісахарид-білковий комплекс (PSK), привертають увагу завдяки своїм імуномодулюючим властивостям і потенціалу протиракової дії. Незважаючи на те, що гриби використовувалися у народній медицині протягом століть, останнім часом їх застосування у терапії раку набуває особливої популярності, оскільки ці сполуки є безпечними для організму і не викликають серйозних побічних ефектів.

Однією з переваг природних полісахаридів є можливість заміщення традиційних органічних синтезів і хімічних модифікацій, які часто призводять до значного забруднення навколишнього середовища. Використання полісахаридів дозволяє зменшити хімічне навантаження та підвищити стійкість

виробництва. Завдяки своїм біосумісним і біорозкладним властивостям, ці полімери ефективно використовуються для регулювання розподілу лікарських засобів у організмі.

Полісахариди містять різноманітні функціональні групи, включно з гідроксильними, аміногрупами та карбоновими кислотами, що дозволяє їх додатково хімічно модифікувати для створення біологічно активних інструментів. Такі модифікації відкривають широкі можливості для застосування у фармацевтичних та медичних сферах: як ад'юванти вакцин, носії для контрольованого вивільнення ліків, каркаси для тканинної інженерії, а також для інших фармакологічних заходів.

Класичні природні полісахариди, такі як глікоген, целюлоза та крохмаль, були адаптовані для біофармацевтичного застосування за допомогою сучасних технологій. До них належать хімічна модифікація, сополімерне щеплення та радикальна полімеризація, що дозволяє отримати функціональні біополімери з контрольованими фізико-хімічними властивостями, придатними для створення інноваційних лікарських систем і біоматеріалів.

Ліки, що містять гідрофобні групи, можна кон'югувати з полісахаридами, які мають гідрофільні функціональні групи, утворюючи амфіфільні проліки. Такі сполуки здатні до самозбірки в наноструктури, що значно покращує їх розчинність у водних середовищах та підвищує біодоступність лікарських засобів. Ця властивість відкриває нові перспективи для створення систем доставки ліків, включно з контрольованим і пролонгованим вивільненням активних молекул, що особливо важливо для терапевтичних препаратів з низькою водорозчинністю.

Водночас використання природних полісахаридів у фармацевтичній та біологічній промисловості має певні обмеження. Оскільки такі полімери зазвичай отримують із рослинних, тваринних або мікробних джерел, властивості матеріалів можуть змінюватися від партії до партії. До основних проблем належать варіабельність в'язкості, ризик мікробного забруднення, поступове

зниження в’язкості під час зберігання, неконтрольоване згущення та нерівномірна швидкість гідратації.

На щастя, більшість цих обмежень можна подолати за допомогою сучасних методів модифікації полісахаридів. Серед них виділяють:

Щеплення (графтинг) – приєднання функціональних груп або полімерних ланцюгів для покращення фізико-хімічних властивостей.

Перехресне зшивання – створення внутрішніх мережевих структур для стабілізації в’язкості та контролю швидкості гідратації.

Змішування з іншими полімерами – комбінація з природними, синтетичними та напівсинтетичними полімерними матеріалами для отримання гібридних систем із покращеними механічними та розчинними характеристиками.

Завдяки цим підходам полісахариди стають більш надійними та передбачуваними компонентами для фармацевтичних і біологічних застосувань, що значно розширює їх потенціал у створенні інноваційних лікарських форм і біоматеріалів.

Полісахариди часто природно утворюються у поєднанні з іншими молекулами, такими як білки, ліпіди або інші полісахариди, що значно ускладнює їх виділення та очищення. Велика різноманітність полісахаридних структур у природі створює додаткову складність, оскільки просте вилучення часто призводить до спільного виділення сторонніх компонентів, що може впливати на їхні фізико-хімічні та біологічні властивості.

Для досягнення високої чистоти необхідно застосовувати точні та ефективні методи розділення, які дозволяють мінімізувати забруднення та зберегти біологічну активність полісахаридів. Крім того, детальне вивчення взаємозв’язку між структурою полісахаридів і їхньою функціональною активністю може відкрити нові перспективи для їхнього використання в біологічних і фармацевтичних системах, включаючи носії лікарських засобів, біоактивні матеріали та каркаси тканинної інженерії. Такий підхід дозволяє

створювати більш ефективні, безпечні та спеціалізовані біополімерні продукти для медичних і промислових застосувань.

Більшість природних біополімерів представляють собою полісахариди, які завдяки своїй хімічній та фізичній різноманітності є перспективними кандидатами для застосування у різних біологічних і медичних сферах. Порівняно з синтетичними полімерними матеріалами, полісахариди мають низку суттєвих переваг: вони безпечні для організму, легкодоступні, стабільні, гідрофільні, біосумісні та здатні до біологічного розкладання, що робить їх екологічно привабливими.

Крім того, полісахариди можна хімічно модифікувати та адаптувати для конкретних потреб, що дозволяє створювати широкий спектр матеріалів — від фармацевтичних носіїв і систем контрольованого вивільнення ліків до плазмозамінників та біоматеріалів для тканинної інженерії. Вони демонструють різноманітні біологічні функції, включаючи імунорегуляторну, противірусну, протизапальну, антиоксидантну та гіпоглікемічну активність.

Останнім часом полісахариди привертають значну увагу як одна з найуспішніших альтернатив традиційним методам лікування. Хоча фармацевтичні препарати на основі вуглеводів уже показали ефективність у багатьох дисциплінах, вони поки що не користуються такою ж популярністю, як препарати на основі білків або нуклеїнових кислот.

Для повного розкриття потенціалу полісахаридів необхідні подальші фундаментальні та прикладні дослідження, що зосереджуються на вивченні взаємозв’язку між їхньою структурою та біологічною активністю. Такі дослідження дозволять краще зрозуміти механізми дії полісахаридів і сприятимуть розробці нових ефективних фармацевтичних і медичних продуктів.

Питання для самоконтролю

11. Яким чином композитні матеріали на основі полісахаридів застосовуються на практиці?
12. Як класифікуються природні полімери залежно від їх походження?

13. Які полісахариди використовують для створення нанонесучих систем у лікувальних цілях?
14. На які категорії поділяються біорозкладні біополімери, отримані з відновлюваних ресурсів?
15. Як класифікуються природні полісахариди?
16. Що являє собою целюлоза?
17. Яку роль у складі рослинних клітин виконують геміцелюлози?
18. Що таке пектин і які його основні функції?
19. Яка функція крохмалю серед полісахаридів?
20. На які два типи поділяються полімерні суміші?
21. Що таке екструзійне формування полімерів і як воно проводиться?
22. Якими фізико-хімічними методами визначають структурні характеристики полімерів, що впливають на їхню конформацію?
23. Як здійснюють екстракцію целюлози та її похідних?
24. Як на практиці проводиться екстракція крохмалю?
25. Що розуміють під модифікацією крохмалю?
26. Яким чином природні полімери застосовуються у медичній практиці?
27. У чому полягає фармацевтичне використання природних полімерів?
28. Який вплив природних полімерів на навколишнє середовище?
29. Що розуміють під відновлюваними біополімерами?
30. Які природні полімери мають важливе значення для економіки та промисловості?
31. Як природні полімери використовуються у харчових технологіях?

Рекомендована навчальна література

1. Омельянчик Л. О. Біохімія : навч.-метод. посіб. для здобувачів ступеня вищ. освіти бакалавра спеціальності «Хімія» освіт.-проф. програми «Хімія» денної форми навчання / Л. О. Омельянчик, В. І. Генчева. Запоріжжя : ЗНУ, 2022. 115 с. URL: https://dspace.znu.edu.ua/jspui/handle/12345/25423

2. Качур І. І. Полісахариди. Мікроскопічне дослідження лікарської рослинної сировини, яка містить полісахариди : навч. посіб. з фармакогнозії / І. І. Качур,

Х. Л. Крч, О. І. Семенова. Ужгород : ДВНЗ «УжНУ», 2020. 58 с. URL: https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/54496

3. Біохімія : навч. посіб. для здобувачів першого (бакалавр.) рівня вищ. освіти / І. А. Іонов, О. О. Дехтярьова, В. Б. Москальов та ін. ; Комун. закл. «Харків. гуманіт.-пед. акад.» Харків. обл. ради. Харків, 2024. 315 с. URL: https://dspace.hnpu.edu.ua/handle/123456789/16247

4. Кучменко О. Б. Біохімія з основами харчової хімії : навч.-метод. посіб. для виконання лаб. робіт та самост. роботи студентів / О. Б. Кучменко, Ю. М. Паливода. Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2025. 114 с. URL: https://lib.ndu.edu.ua/handle/123456789/4038

5. Чигвінцева О. П. Харчова хімія : навч. посіб. / О. П. Чигвінцева, А. В. Токар. Дніпропетровськ : Принтхаус Римм, 2014. 256 с. URL: https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/7445

6. Бобрівник Л. Д., Логвін В. М. Хімічні процеси виробництв сахаридів : монографія. Київ : Експрес-Поліграф, 2014. 268 с.

7. Застосування мембранних процесів у технології одержання пектинових концентратів : монографія / Г. В. Дейниченко, В. Г. Мирончук, В. В. Гузенко та ін. ; Харків. держ. ун-т харчування та торгівлі. Харків : Факт, 2016. 176 с.

8. Технологічні комплекси харчових виробництв : навч. посіб. / В. І. Теличкун, О. М. Гавва, Ю. С. Теличкун та ін. Київ : Сталь, 2017. 456 с.

Розділ 9. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА КРОХМАЛЮ

9.1. Крохмаль як представник вуглеводів

Крохмаль — це природний полісахарид, який складається з молекул глюкози та виконує функцію запасання вуглеводів у рослинах. Його синтезують більшість рослинних клітин, а накопичується він у різних органах, таких як насіння (наприклад, зернові та бобові культури), бульби (картопля), коренеплоди (морква), деякі фрукти та навіть у зеленому банані.

Разом із сахарозою та лактозою крохмаль належить до трьох найпоширеніших харчових вуглеводів. Серед них він є основним джерелом вуглеводів у щоденному раціоні людини, забезпечуючи енергію для фізіологічних та метаболічних процесів.

Що стосується властивостей крохмалю, він присутній у клітинах рослин у формі гранул і складається з двох основних гомополісахаридів: амілози, яка формує лінійні ланцюги молекул глюкози, та амілопектину, що має розгалужену структуру. Співвідношення цих компонентів визначає фізико-хімічні властивості крохмалю, такі як розчинність, здатність до гелювання та здатність утворювати клейстер**.**

Амілоза — це лінійний (нерозгалужений) гомополісахарид, що складається приблизно з 500–600 молекул глюкози, з'єднаних між собою α-(1→4) глікозидними зв'язками. Її молекулярна структура утворює спіральну конфігурацію, де для повного повороту спіралі припадає близько шести глюкозних одиниць. Амілоза добре розчиняється у воді та, як правило, локалізується в центральній частині крохмальних гранул, формуючи їх ядро.

Структурні властивості амілози визначають її функціональні характеристики: здатність до формування гелів, розчинність у воді та вплив на текстуру продуктів, у яких використовується крохмаль. Завдяки лінійності молекул, амілоза більш схильна до кристалізації порівняно з амілопектином.

Амілопектин складає приблизно 80% усіх полісахаридів, що надходять з харчовими продуктами. На відміну від лінійної амілози, амілопектин має

розгалужену структуру, що забезпечує йому особливі властивості — високу розчинність у воді, зменшену здатність до кристалізації та легше утворення клейстеру під час термічної обробки. Завдяки цим характеристикам амілопектин значною мірою визначає текстуру та консистенцію багатьох продуктів харчування, у яких присутній крохмаль.

9.2. Класифікація крохмалю

Залежно від швидкості та ступеня гідролізу α-амілазою, крохмаль поділяють на три основні категорії:

Швидкозасвоюваний крохмаль — цей тип крохмалю швидко розщеплюється ферментами та швидко всмоктується в тонкому кишечнику, забезпечуючи швидкий приріст глюкози в крові.

Повільно засвоюваний крохмаль — гідроліз цього крохмалю відбувається повільніше, що забезпечує поступове надходження глюкози та стабільний рівень енергії протягом тривалого часу.

Резистентний крохмаль (RS) — назва цього типу крохмалю пояснюється його здатністю протидіяти дії α-амілази та не засвоюватися у тонкому кишечнику. Проте він може ферментуватися бактеріальною мікрофлорою товстої кишки, виконуючи функцію харчових волокон і сприяючи здоров'ю кишківника.

Таким чином, класифікація крохмалю за здатністю до гідролізу дозволяє оцінити його вплив на метаболізм глюкози та потенційні користь для здоров'я.

Резистентний крохмаль (RS) ділиться на кілька типів залежно від його природи та стійкості до ферментативного гідролізу:

Тип I (RS1) — це крохмаль, недоступний для ферментів через його «захист» клітинною стінкою. Він міститься в цілісних насінних зернах та бобових культурах. Крохмаль залишається недоступним для травних ферментів, поки клітинна структура не порушена.

Тип II (RS2) — крохмаль у природній формі зерен, який завдяки кристалічній структурі частково протистоїть гідролізу. Ці молекули присутні,

наприклад, у зелених бананах або в продуктах, приготованих у недостатній кількості води для повної желатинізації.

Тип III (RS3) — ретроградований крохмаль, що утворюється після термічної обробки та подальшого охолодження желатинізованого крохмалю. Лінійні ланцюги амілози та розгалужені ланцюги амілопектину повторно агрегують у кристалічну структуру, процес який називають ретроградацією. Ступінь ретроградації залежить від вмісту амілози. Саме цей процес відповідає за черствіння хліба — повторне нагрівання продукту зменшує кристалізацію та частково відновлює його текстуру.

Тип IV (RS4) — хімічно модифікований крохмаль, що використовується в комерційних харчових продуктах. Модифікації (заміщення або зшивка) надають крохмалю стійкості до заморожування та охолодження, а також дозволяють створювати продукти з низьким вмістом калорій, зберігаючи кремову текстуру та смакові якості, характерні для жирів.

Таблиця 14 – Порівняння типів резистентного крохмалю (RS)

Тип RS	Природа / Джерело	Структура	Механізм стійкості	Особливості та застосування
RS1	Цілісні насіння, бобові	Крохмаль «захищений» клітинною стінкою	Недоступний для α-амілази через цілісність клітин	Травиться лише після механічного або термічного руйнування; функціонує як харчові волокна
RS2	Зелені банани, сирі крохмальні гранули	Природні кристалічні гранули	Кристалічна структура обмежує ферментативний гідроліз	Частково протистоїть перетравленню; забезпечує повільне засвоєння глюкози
RS3	Ретроградований крохмаль після нагрівання та охолодження	Кристалічні агрегати амілози та амілопектину	Ретроградація після желатинізації	Відповідає за черствіння хліба; відновлюється при повторному нагріванні; функціонує як харчові волокна

Тип RS	Природа / Джерело	Структура	Механізм стійкості	Особливості та застосування
RS4	Хімічно модифіковані крохмалі в харчових продуктах	Зшиті або заміщені молекули	Хімічні модифікації роблять крохмаль стійким до гідролізу	Використовується у низькокалорійних продуктах; зберігає кремову текстуру; стійкий до охолодження і заморожування

Таким чином, різні типи резистентного крохмалю визначають його фізіологічні властивості та функціональне використання в харчових продуктах, зокрема у виробництві хліба, низькокалорійних страв та продуктів для контролю рівня глюкози.

Процес виробництва картопляного крохмалю є складною технологічною процедурою, що включає кілька послідовних етапів та спеціалізоване обладнання, розроблене для максимально ефективного виділення крохмалю з картоплі. Як важливий компонент харчової промисловості, картопляний крохмаль широко використовується у виробництві продуктів харчування, а вдосконалення технологій переробки, сучасне обладнання та інженерні інновації значно підвищують ефективність і якість кінцевого продукту.

Для ефективного та надійного виробництва картопляного крохмалю особливе значення має використання високоякісного обладнання від авторитетних світових виробників. Співпраця з перевіреними постачальниками гарантує стабільну продуктивність, тривалий термін служби та відповідність сучасним технологічним стандартам харчової промисловості.

Серед відомих та провідних виробників обладнання для виробництва картопляного крохмалю можна виділити: GEA Group AG (Gesellschaft für Entstaubungsanlagen) – Німеччина; Alfa Laval AB – Швеція; Andritz AG – Австрія; Bühler AG – Швейцарія; Nijhuis Industries – Нідерланди; Myande Group (ТОВ «Мянде Груп») – Китай; Zhengzhou Jinghua Industry Co., Ltd. – Китай; Swastik Microfab – Індія.

Вибір надійного виробника дозволяє не лише підвищити ефективність процесів виділення крохмалю з картоплі, а й впроваджувати інноваційні технології, що покращують якість кінцевого продукту та оптимізують енергоспоживання.

9.3. Безвідходні технології крохмалю

Безвідходні технології крохмалю — це сучасний підхід до виробництва, який спрямований на максимальне використання всієї сировини, мінімізацію відходів та перетворення побічних продуктів у корисні матеріали. Такі технології дозволяють підвищити ефективність виробництва, зменшити негативний вплив на навколишнє середовище та отримати додаткові комерційні продукти.

Основні принципи безвідходних технологій:

Повне використання сировини. Картопля, зернові або інші крохмалевмісні культури повністю обробляються: від крохмалю до клітковини та білка. Залишки після екстракції крохмалю (шлам) не викидаються, а переробляються.

Перетворення відходів у цінні продукти. Клітковина та пульпа: використовується як корм для тварин або сировина для виробництва біопластиків і брикетів для палива. Протеїнові фракції: виділяються та застосовуються як кормові або харчові білкові концентрати. Рідкі залишки: очищаються і використовуються для отримання біогазу або в технологічних процесах (повторне миття, теплообмін).

Енергетична ефективність та ресурсозбереження. Вода, що використовується в процесі миття та екстракції, повторно очищується і повертається в цикл. Відпрацьоване тепло від сушіння та варіння може використовуватися для підігріву нової порції сировини.

Сучасні технології контролю якості та автоматизації. Використання автоматизованих систем контролю дозволяє зменшити втрати крохмалю та

покращити якість кінцевого продукту. Оптимізація процесів дозволяє мінімізувати утворення шламів і механічних відходів.

Екологічні переваги. Зменшення скидання промислових стоків у навколишнє середовище. Зменшення використання хімічних реагентів завдяки точному контролю процесів.

Ключові етапи виробництва крохмалю з картоплі включають:

Чищення та миття. Основна мета цього етапу — видалити бруд, каміння, піщинки та інші сторонні домішки з картоплі. Якісне очищення сировини забезпечує ефективну роботу подальших стадій та запобігає пошкодженню обладнання.

Дроблення та подрібнення. На цьому етапі картопля перетворюється на дрібні частинки, підготовлені для виділення крохмалю. Сучасні подрібнювальні установки дозволяють досягати високої продуктивності та рівномірності фракцій, що значно підвищує ефективність наступних технологічних процесів.

Екстракція та очищення крохмалю. Мета — відділення крохмалю від клітковини, білків та інших компонентів. Отриманий шлам проходить через очисні установки, де відокремлюється від картопляної шкірки та інших твердих частинок. Ретельність цього процесу безпосередньо впливає на чистоту та якість кінцевого крохмалю.

Зневоднення та сушіння крохмалю. Завдання цього етапу — видалити залишкову вологу, щоб отримати сухий порошкоподібний крохмаль. Після очищення шлам необхідно швидко зневоднити, оскільки тривалий контакт крохмалю з водою може призвести до потемніння продукту, утворення піни та зниження його в’язкості, що погіршує якість кінцевого продукту.

Наразі розроблено і впроваджено сучасну безвідходну технологію виробництва крохмалю, яка значно підвищує ефективність процесу та робить його більш екологічним. Основою цієї технології є використання гідроциклонів, які здатні виконувати більшість операцій у виробничому циклі: промивання шламу, сепарування крохмалю та його очищення.

Завдяки такому підходу значно зменшується споживання води — приблизно на 0,5 м³ на кожну тону картоплі. Крім того, відходи виробництва не утилізуються як сміття, а можуть використовуватися як високоякісний корм для тварин. Використана вода проходить очищення через спеціалізовані системи, що робить технологічну лінію максимально екологічно чистою.

Гідроциклони відзначаються компактністю, економією простору та зменшенням потреби в ручній праці. Ці вдосконалення дозволяють підвищити продуктивність та ефективність виробництва, що безпосередньо збільшує конкурентоспроможність кінцевого продукту на ринку.

Для забезпечення безперебійної роботи лінії додатково можуть застосовуватися такі компоненти, як силоси для зберігання сировини та готового продукту, конвеєри, елеватори та автоматизовані системи керування. Всі ці елементи дозволяють інженерам харчової промисловості оптимізувати процеси, підвищити якість кінцевого крохмалю та зменшити витрати на виробництво.

Кукурудзяний крохмаль переважно виробляють методом мокрого помелу, який включає кілька послідовних етапів. Спочатку зерна кукурудзи замочують у воді або спеціальному розчині для пом’якшення, що полегшує подальше відділення компонентів. Потім відділяють зародок, який містить цінну кукурудзяну олію, а решту зерна подрібнюють для виділення крохмалю з ендосперму. Отриманий крохмаль очищають від білків і клітковини, висушують до потрібної вологості та за необхідності модифікують для надання специфічних властивостей, необхідних у харчовій або промисловій сфері.

9.4. Досягнення в нанокомпозитах на основі крохмалю для функціональних харчових систем

Харчова промисловість дедалі активніше використовує потенціал нанокомпозитів, особливо в упаковці продуктів, доставці інгредієнтів та контролі якості. Серед них великої уваги заслуговують нанокомпозити на основі крохмалю, оскільки крохмаль є природним, біосумісним і доступним матеріалом, а нанорозмірні властивості підвищують його функціональність у

харчових системах. Завдяки малому розміру частинок, високому співвідношенню поверхні до об'єму та можливості регулювати хімію поверхні, наночастинки крохмалю демонструють відмінну адсорбційну здатність і ефективне завантаження біоактивних сполук. У нанометровому масштабі вони мають збільшену площу поверхні та поверхневу енергію, що підвищує швидкість та контрольованість вивільнення поживних речовин, ферментів або терапевтичних засобів. Ці властивості особливо важливі для створення функціональних продуктів харчування та харчових добавок, які забезпечують цілеспрямовану доставку, пролонговану дію та підвищену біодоступність активних компонентів.

Незважаючи на зростаючий інтерес до однонуклеотидних нанокомпозитів, залишаються значні виклики у повній реалізації їхнього потенціалу, особливо щодо забезпечення стабільності та біоактивності в складних харчових системах. Традиційні методи аналізу, такі як рентгенівська дифракція, просвічуюча електронна мікроскопія та інфрачервона спектроскопія, широко використовуються для вивчення нанокомпозитів, проте вони часто не дозволяють оцінити динамічні багатофазні взаємодії, що відбуваються в харчових матрицях. Сучасні підходи, включно з ядерним магнітним резонансом (ЯМР) та технологіями штучного інтелекту (ШІ), відкривають нові можливості для більш детального та прогнозного аналізу. ЯМР дозволяє неруйнівно досліджувати хімічний склад і просторову структуру матеріалів, відстежувати молекулярні взаємодії та структурні зміни, а також оцінювати стабільність наноматеріалів за різних умов. Це робить ЯМР надзвичайно цінним інструментом у харчовій науці, де розуміння взаємодії між інгредієнтами на молекулярному рівні є ключовим для створення нових та функціональних харчових продуктів.

Застосування штучного інтелекту (ШІ) підвищує ефективність і точність розробки наноматеріалів. Поєднуючи ШІ з експериментальними даними, дослідники можуть прогнозувати властивості матеріалів, оптимізувати процеси формулювання та створювати нові наноматеріали з заданими

функціональними характеристиками. У випадку однонуклеотидних наноматеріалів ШІ особливо корисний для оптимізації конструкції матеріалів, передбачення їх стабільності в часі та покращення біоактивності й сенсорних властивостей нанокомпозитів у харчових продуктах. Синергія ШІ та ЯМР відкриває безпрецедентні можливості для моделювання, тестування та вдосконалення нанокомпозитів, прискорюючи розробку нових функціональних харчових інгредієнтів.

9.5. Інноваційні методи виготовлення нанокомпозитів на основі крохмалю

Розробка однокомпонентних нанокомпозитів досягла значного прогресу завдяки впровадженню передових методів виготовлення, що відкривають нові можливості для підвищення стабільності, біоактивності та функціональності крохмалю в харчових продуктах. Сучасні технології, такі як мікрофлюїдні системи, електроформування та лиття розчинником, дозволяють точно контролювати розмір, форму, морфологію та розподіл частинок, створюючи матеріали з високою чистотою та однорідністю. Лиття розчинником забезпечує виробництво складних структур з невисокими вимогами до обладнання, електроформування дає можливість отримувати волокна високої якості та універсального застосування, а мікрофлюїдні технології дозволяють контролювати наномасштабну морфологію і розподіл частинок, що особливо важливо для доставки біоактивних компонентів та контрольованого їх вивільнення.

Попри значний потенціал цих підходів, вони пов’язані з труднощами у масштабуванні виробництва, забезпеченні відтворюваності та стабільної якості. Інтеграція штучного інтелекту дозволяє суттєво підвищити ефективність розробки, прогнозувати властивості матеріалів, оптимізувати їхній склад і структуру, а також вести контроль процесів у реальному часі. Поєднання цих інноваційних технологій відкриває нові перспективи для харчової промисловості, забезпечуючи створення продуктів із контрольованим

вивільненням активних речовин, підвищеною функціональністю та покращеними сенсорними властивостями.

9.6. Промислове виробництво одноніткових наночастинок

Масштабування виробництва одноніткових наночастинок для потреб харчової промисловості потребує точного контролю умов технологічного процесу, і саме тут штучний інтелект (ШІ) проявляє свою значущість. Наприклад, розроблено автономну багатоетапну платформу, яка використовує машинне навчання для оптимізації параметрів виробництва — швидкості потоку, температури та pH — що дозволяє забезпечувати стабільну якість матеріалу та економічно ефективне масштабування наночастинок харчового класу.

Така інновація приносить прямі вигоди харчовій промисловості: скорочується час та витрати на виробництво, підвищується однорідність матеріалів для великомасштабних застосувань. Завдяки моделюванню на основі даних можна здійснювати моніторинг та оптимізацію процесів у режимі реального часу, що підвищує ефективність і стабільність виробництва нанокомпозитів на основі крохмалю. Дослідження показують, що інтеграція ШІ не лише покращує масштабованість і економічну життєздатність технології, а й сприяє загальній ефективності, надійності та фінансовій доцільності впровадження нанокомпозитів у харчову промисловість.

9.7. Механістичне розуміння біоактивності однонуклеотидних клітин нанокомпозитів на основі крохмалю

Біоактивність однонуклеотидних наночастинок (ОННК) є ключовим чинником, що визначає їх функціональні властивості, стабільність та ефективність у харчових системах. Розуміння молекулярних механізмів взаємодії ОННК та факторів, які впливають на їхню біоактивність, дає цінні теоретичні й практичні знання для оптимізації дизайну та застосування цих наноматеріалів. Для повного аналізу біоактивності особливо важливо дослідити

складові компоненти нанокомпозитів, адже саме вони значною мірою визначають функціональність і поведінку частинок у харчових продуктах. Зазвичай ОННК містять біоактивні сполуки, такі як білки, полісахариди, поліфеноли та вітаміни, кожна з яких надає специфічні структурні та функціональні властивості. Білки підвищують механічну міцність і стабільність наночастинок, полісахариди покращують здатність утримувати воду та підвищують біосумісність, а поліфеноли завдяки своїм антиоксидантним і антимікробним властивостям розширюють можливості застосування наночастинок у консервації продуктів та розробці рецептур, спрямованих на зміцнення здоров'я споживачів.

Для досягнення цілей сталого розвитку надзвичайно важливо впроваджувати екологічно чисті методи виробництва однокомпонентних наночастинок у нанокомпозитах на основі крохмалю. Традиційні підходи, такі як кислотний гідроліз або зшивання емульсій, часто споживають багато енергії та утворюють токсичні побічні продукти, що обмежує їх екологічну безпечність. Сучасні дослідження зосереджені на «зеленому» синтезі, включно з ультразвуковим обробленням та методами зеленої хімії, які дозволяють зменшити вплив на навколишнє середовище. Наприклад, ультразвуковий гідроліз оцтовою кислотою використовували для отримання нанокристалів крохмалю, що забезпечило підвищену кристалічність та покращену стабільність емульсій. Також були синтезовані наночастинки, покриті крохмалем, із застосуванням рослинних екстрактів, що дозволяє уникати використання шкідливих хімічних відновлювачів та органічних розчинників, роблячи виробництво більш екологічно безпечним та стійким.

9.8. 3D-друк з натуральним крохмалем

З точки зору адитивного виробництва або 3D-друку харчових продуктів, крохмаль є одним із найбільш універсальних біополімерів завдяки здатності формувати пастоподібну структуру та поєднуватися з іншими харчовими інгредієнтами, створюючи матеріали, придатні для друку. Цей підхід дозволяє

виготовляти надруковані вироби, такі як макаронні вироби, печиво, хлібобулочні та кондитерські вироби, із високим рівнем точності та відтворюваності форми. Використання крохмалю в 3D-друку забезпечує низку переваг: покращене естетичне представлення їжі, можливість додавати різноманітні смаки та функціональні інгредієнти, біорозкладність матеріалу та розширення креативних можливостей у дизайні харчових продуктів.

Особливо перспективним є персоналізований підхід, що дозволяє створювати продукти, адаптовані до індивідуальних дієтичних потреб та смакових уподобань, а також контролювати вміст конкретних компонентів у їжі для людей із харчовими обмеженнями. Крім того, 3D-друк харчових продуктів має потенціал для застосування у космічній індустрії, де традиційне виробництво їжі обмежене, дозволяючи створювати їжу безпосередньо у замкнених або екстремальних середовищах. Додатково, цей метод оптимізує процес виробництва харчових продуктів, підвищує ефективність, зменшує кількість відходів та економить час, відкриваючи нові горизонти для інновацій у харчовій промисловості.

Натуральний крохмаль володіє виразними реологічними властивостями, що робить його придатним для 3D-друку харчових продуктів, проте він також має певні обмеження, такі як низька стійкість до нагрівання, механічного тиску та зсуву, а також схильність до ретроградного розпаду після зберігання. Ці властивості можна покращити за допомогою різних методів модифікації крохмалю, що дозволяє адаптувати його до конкретних потреб 3D-друку. Зокрема, можна змінювати молекулярну структуру крохмалю, підвищуючи його міцність, гнучкість і термостабільність, що робить матеріал більш надійним під час екструзії та зберігання.

Матеріали для 3D-друку повинні мати оптимальну в’язкість: вони повинні бути достатньо рідкими, щоб безперервно та рівномірно екструдуватися через друкарську головку, і водночас достатньо формостійкими, щоб зберігати форму надрукованого продукту після екструзії. Висока самонесучість та збалансована плинність харчового матеріалу забезпечують плавну екструзію, точну форму

продукту на друкарській платформі та стабільну конструкцію готового виробу. Оптимізація цих параметрів дозволяє досягти високої якості надрукованих харчових виробів і максимізує ефективність процесу 3D-друку.

9.9. Мікро- та наноінкапсуляційні властивості крохмалю

Мікро- та наноінкапсуляційні властивості крохмалю стосуються його здатності інкапсулювати біоактивні сполуки чи інгредієнти на мікро- або нанорівні, що підвищує їх стабільність, забезпечує контрольоване вивільнення та покращує біодоступність. Завдяки своїй біосумісності та біорозкладності, крохмаль широко використовується для інкапсуляції різних речовин, включно з вітамінами, ароматизаторами, поліфенолами, антиоксидантами та фармацевтичними препаратами. Для цього застосовують методи розпилювального сушіння, коацервації та емульгування, які дозволяють досягти цілеспрямованої доставки та пролонгованого вивільнення активних компонентів.

Наприклад, у пілотних дослідженнях використовували розпилювальну сушарку для створення крохмальних систем, що поєднують різні джерела крохмалю з природними антиоксидантами. Аналіз показав наявність молекулярних взаємодій між крохмалем та антиоксидантами, наявність ендотермічних піків у діапазоні 91–112,1°C та рівномірний розподіл антиоксидантів у крохмальній матриці. Отримані порошки характеризувалися низьким вмістом вологи (<10%), високою легкістю (L = 90) та жовтим відтінком. Результати демонструють значний потенціал крохмальних систем у харчовій та фармацевтичній промисловості, зокрема для підвищення стабільності, збереження функціональних властивостей та ефективності антиоксидантів.

9.10. Крохмаль для біорозкладних плівок, композитних плівок на основі наночастинок та їх застосування в харчових продуктах

Останнім часом крохмаль привертає значну увагу у розробці біорозкладних плівок та композитних матеріалів на основі наночастинок завдяки

своїй відновлюваній та біосумісній природі. Біорозкладні крохмальні плівки пропонують екологічну альтернативу традиційним пластмасам і можуть бути вдосконалені за допомогою пластифікаторів та функціональних добавок для підвищення гнучкості, механічної міцності та бар'єрних властивостей проти вологи, кисню та газів.

Композитні плівки на основі наночастинок застосовуються переважно в харчовій упаковці, де вони сприяють подовженню терміну придатності продуктів, збереженню їх якості, а також зменшенню харчових відходів, захищаючи продукцію від росту мікроорганізмів та окислення. Використання крохмальних плівок і нанокомпозитних матеріалів у пакуванні забезпечує екологічні, безпечні та ефективні рішення, що відповідають сучасним нормативним вимогам щодо матеріалів, що контактують із харчовими продуктами, та сприяє сталому розвитку харчової промисловості.

На основі картопляного, касавового, бобового та кукурудзяного крохмалю були розроблені водопоглинаючі аерогелі, які демонструють низьку щільність, високу пористість та добру еластичність, а також видатну водопоглинальну здатність. Крім того, нанокомпозитні плівки на основі крохмалю характеризуються підвищеною термічною стабільністю, хімічною стійкістю, бар'єрними властивостями та антибактеріальною ефективністю.

Ці властивості роблять біорозкладні крохмальні плівки та нанокомпозитні матеріали відмінним вибором для стійких рішень у харчовій упаковці, оскільки вони ефективно пригнічують ріст мікроорганізмів і сприяють розвитку циркулярної економіки. Сучасні інновації, такі як водопоглинаючі аерогелі, сухі термооброблені крохмальні плівки та вдосконалені покриття, демонструють високий потенціал для екологічно чистого та ефективного застосування в пакувальних технологіях, одночасно підтримуючи безпеку та якість харчових продуктів.

Найбільш типовим прикладом інноваційного обладнання на заводах із виробництва крохмалю є технологічні рішення компанії Myande Group (Китай). Це сучасні комплексні системи, що охоплюють усі етапи виробництва — від

мокрого помелу та сепарації до сушіння й очищення готового продукту. Лінії оснащені високопродуктивними декантерами, центрифугами та сушарками, що забезпечують високий вихід крохмалю при мінімальних витратах води та енергії.

Обладнання інтегрується з автоматизованими системами управління та платформами Industry 4.0, що дозволяє контролювати процеси в режимі реального часу та оптимізувати їхню ефективність. Крім того, технології Myande орієнтовані на екологічність: замкнені цикли, зниження відходів і викидів, енергозбереження. Лінії доповнюються допоміжним обладнанням — силосами, конвеєрами та елеваторами — для забезпечення безперебійного транспортування сировини та готового продукту.

Завдяки поєднанню автоматизації, енергоефективності та екологічності, рішення Myande дозволяють підвищити стабільність, продуктивність та якість виробництва крохмалю.

9.11. Інноваційне обладнання, яке застосовують на заводах по виробництву крохмалю

9.11.1. Штифтовий млин

Штифтовий млин Myande — це високопродуктивне обладнання для тонкого помелу, спеціально розроблене для ефективного вилучення крохмалю з кукурудзи, картоплі та бобових культур. Його також можна застосовувати у виробництві фруктових соків, а також для сухого помелу крохмалю та рисового борошна. Використання цього млина спрощує технологічний процес, підвищує вихід крохмалю та забезпечує значні економічні переваги для підприємства.

Система змащення характеризується низьким енергоспоживанням, малою потужністю та мінімальними експлуатаційними витратами. Використання гнучкої опори підшипника зменшує вібрації та забезпечує стабільну роботу обладнання. Комбінований автоматичний натяжний пристрій для привідного ременя підвищує ефективність передачі та підтримує надійну роботу. Система оснащена сенсорним керуванням із записом виробничих даних у реальному часі

та дозволяє легко налаштовувати параметри процесу. Імпортні підшипники SKF забезпечують тривалу стабільну роботу. Динамічний диск має високоточний баланс і інноваційну конструкцію, що полегшує обслуговування та знижує експлуатаційні витрати.



Рис. 32. Штифтові млини Myande, Китай [32]

Таблиця 15 – Технічна характеристика

Модель	**МЗМ750**	**МЗМ1000**	**МЗМ1200**
Продуктивність товарної кукурудзи, т/год	5~8	15–18	18–25
Зовнішній діаметр рухомого диска, мм	750	1025	1200
Швидкість обертання, об/хв	3800	3100	2900
Потужність головного двигуна, кВт	90	220	250
Вміст зв'язуючого крохмалю, %	<15	<15	<15
Розміри, мм	2250x1400x1700	2710x1600x2375	3110x2060x2696

Сучасне обладнання для виробництва крохмалю, таке як штифтові млини та системи змащення від Myande Group, поєднує високу ефективність, надійність та економічність. Використання автоматизованих рішень, імпортних

підшипників і інноваційних конструкцій дозволяє підвищити вихід продукції, забезпечити стабільну роботу та знизити витрати на експлуатацію. Завдяки цьому підприємства отримують можливість оптимізувати технологічні процеси, покращити якість кінцевого продукту та впроваджувати енергоефективні та екологічні рішення, що відповідають сучасним стандартам харчової промисловості.

9.11.2. Відцентровий сепаратор

Відцентровий сепаратор Myande є ключовим обладнанням у сучасному виробництві крохмалю та його побічних продуктів, широко застосовуваним для попереднього концентрування та розділення крохмального молока, концентрування клейковини, зневоднення та концентрування білка. Його конструкція спроєктована так, щоб забезпечувати високу ефективність, надійність і довготривалу роботу в промислових умовах. Особливою перевагою є унікальний підвісний приводний механізм, який усуває навантаження на вал та підшипники, що не тільки продовжує термін служби обладнання, а й зменшує потребу в частому обслуговуванні та експлуатаційних витратах.

Сепаратор обладнаний максимізованим диском і обертовим барабаном, що дозволяє досягати високої продуктивності обробки та відмінного ефекту розділення, забезпечуючи ефективне концентрування крохмалю та білків із збереженням їхніх властивостей. Великі форсунки з кулачковим блокувальним пристроєм мінімізують ризик засмічення, що дає змогу підтримувати тривалу безперервну роботу навіть за високих навантажень.

Для забезпечення максимальної стабільності роботи застосовується високоточний динамічний баланс ротора, який гарантує плавне обертання та мінімальні вібрації. Крім того, обладнання оснащене датчиками температури на кожному підшипнику, що дозволяють моніторити стан вузлів у реальному часі, а датчик вібрації на головному вузлі вала відстежує роботу механізму та своєчасно сигналізує про будь-які відхилення чи потенційні проблеми.



Рис. 33. Відцентровий сепаратор Myande, Китай [33]

Таблиця 16 – Технічна характеристика

Модель	**MLXD30**	**MLXD36**	**MLXD38**
Максимальна продуктивність, м³/год	110	220	250
Швидкість обертання валу, об/хв	3300	2900	2900
Номер сопла	20	30	30
Діаметр обертового барабана, мм	780	940	980
Потужність, кВт	110/132	220	250
Розміри, мм	3050x1570x2420	3400x1780x2840	3400x1780x2840

Завдяки поєднанню інноваційної механіки, високоточних компонентів та систем моніторингу, відцентровий сепаратор Myande забезпечує ефективну, безпечну та стабільну роботу, підвищує продуктивність виробництва крохмалю та супутніх продуктів, а також сприяє зменшенню експлуатаційних витрат та підвищенню загальної рентабельності підприємства.

9.11.3. Гвинтовий прес

Шнековий прес Myande та гідравлічний шнековий прес Myande – це високотехнологічне механічне обладнання, спеціально розроблене для ефективного зневоднення сировини у виробництві крохмалю та в інших галузях харчової промисловості. Ці преси особливо добре підходять для обробки матеріалів із високим вмістом вологи, таких як кукурудзяні зародки та волокнисті залишки кукурудзи, які утворюються під час мокрого помелу зерна.

Використання шнекових та гідравлічних пресів дозволяє значно знизити вологість сировини перед подачею на стадію сушіння, що сприяє економії енергії, скороченню часу сушіння та підвищенню загальної продуктивності виробничої лінії. Крім того, конструкція обладнання забезпечує стабільну та безперебійну роботу, високу ефективність відділення вологи, а також оптимізацію виходу крохмалю та інших цінних компонентів.

Ці преси також зменшують навантаження на наступне обладнання, продовжують термін його служби та сприяють покращенню якості кінцевого продукту. Завдяки поєднанню механічної надійності, високої продуктивності та економії енергії, шнекові та гідравлічні преси Myande є ключовими компонентами сучасних технологічних ліній з переробки крохмалю, забезпечуючи ефективність і конкурентоспроможність виробництва.



Рис. 34. Гвинтовий прес Myande, Китай [34]

Компактна конструкція та зручне керування роблять грохот Myande ефективним і простим у використанні. Обладнання оснащене запатентованою цільною рамою грохота, що відзначається високою міцністю та довговічністю, забезпечуючи тривалий термін служби навіть за інтенсивної експлуатації.

Для безпечної та стабільної роботи використовується автоматична система змащення, яка підтримує оптимальні умови роботи вузлів. Крім того, грохот обладнаний гідравлічним пристроєм керування на розвантажувальному кінці, що дозволяє регулювати рівень вологості готового продукту, забезпечуючи стабільну якість та відповідність технологічним вимогам виробництва.

Таблиця 17 – Технічна характеристика

Модель	**MJGY60**	**MJGY65**	**MJGL50**	**MJGL65**
Швидкість обертання, об/хв	12	12	14	10.5
Потужність, кВт	30	55	22	37
Продуктивність, т/д	1000	700	300	350
Максимальна вихідна вологість, %	53	60	53	60-62
Товщина сітки, мм	8	2; 2; 4	1,5; 1,5; 1,2	1,5; 1,5; 1,5
Розмір сітки, мм	0,8	2,5; 2; 1,5	2; 1,5; 1,2,	2,5; 2; 1,5

Завдяки цим характеристикам грохот Myande поєднує надійність, довговічність та точний контроль параметрів продукту, що робить його ключовим елементом сучасних ліній з переробки крохмалю та інших харчових сировин.

9.11.4. Трубчаста сушарка

Трубчаста сушарка Myande — це сучасне протитечійне сушильне обладнання, спеціально оптимізоване для особливостей переробки крохмалю та сировини з високим вмістом вологи. Завдяки конструкції протитечії сушарка забезпечує ефективний теплообмін між гарячим повітрям і крохмальним

продуктом, що дозволяє рівномірно знижувати вологість і отримувати продукт з однорідною консистенцією та високою якістю.

Трубчаста конструкція сприяє стійкій і безперервній роботі обладнання, зменшуючи ризик перегріву та локального перегрівання продукту. Використання сучасних матеріалів і технологій управління гарантує високу енергоефективність, надійність та легкість обслуговування. Така сушарка ідеально підходить для інтеграції у сучасні лінії виробництва крохмалю, забезпечуючи підвищену продуктивність, стабільну якість кінцевого продукту та економію енергії.



Рис. 35. Трубчаста сушарка Myande, Китай [35]

Вона демонструє високу ефективність при сушінні сипучих матеріалів з великим вмістом вологи, що особливо актуально для кукурудзяного крохмалю, харчової та зернопереробної промисловості. Завдяки великим випаровувальним об’ємом сушарка здатна обробляти матеріали з підвищеною вологістю, забезпечуючи рівномірне та швидке зневоднення.

Система дозволяє гнучко регулювати час сушіння відповідно до властивостей сировини та вимог до кінцевого продукту, що гарантує високу якість обробки різних матеріалів. Завдяки цьому процес сушіння може бути адаптований як для безперервного виробництва, так і для періодичного режиму,

що робить обладнання універсальним і придатним для різних технологічних завдань у харчовій та крохмальній промисловості.

Таблиця 18 – Технічна характеристика

Модель	Площа, м²	Продуктивність сушіння, кг H_2O/м²год	Швидкість обертання, об/хв	Потужність, кВт	Розміри, мм
МГЗГ400	400	2,5~4,5	7~11	30	10780×2700×850
МГЗГ500	500			37	10900×2810×4110
МГЗГ600	600			45	11030×3030×4270
МГЗГ700	700			55	11170×3260×3875
МГЗГ800	800			75	11440×3470×4100
МГЗГ1000	1000			90	12200×3660×4310
МГЗГ1200	1200			110	12280×3980×4730
МГЗГ1300	1300			132	12900×4160×4900
МГЗГ1500	1500			132	14000×4600×5400
МГЗГ1600	1600			160	14500×5000×5900

Трубчаста сушарка Myande забезпечує ефективне та гнучке сушіння матеріалів з високим вмістом вологи, адаптуючись як до безперервного, так і до періодичного виробництва, що робить її універсальним рішенням для харчової та крохмальної промисловості.

9.11.5. Млин для видалення зародків

Млин для видалення зародків призначений для подрібнення замоченої кукурудзи та працює у поєднанні з циклоном для відділення кукурудзяних зародків від зародкового молока. Для підвищення ефективності вилучення зародків рекомендується використовувати двоступеневе подрібнення та двоступеневе розділення. Регулювання зазору між рухомим та нерухомим дисками дозволяє зменшити швидкість подрібнення кукурудзяних зародків. Окрім кукурудзи, млин також може застосовуватися для грубого подрібнення замочених бобів сої на підприємствах з виробництва бобових продуктів.



Рис. 36. Млин для видалення зародків Myande, Китай [36]

Обладнання відзначається великою ємністю, низьким енергоспоживанням та стабільною роботою. Воно забезпечує зручне керування та легке обслуговування, а також оснащене функцією самозахисту для підвищення безпеки та надійності експлуатації.

Таблиця 19 – Технічна характеристика

Модель	**Діаметр диска, мм**	**Швидкість обертання, об/хв**	**Дроблення 1-го етапу**			**Дроблення 2-го етапу**		
			Міст-кість, т/год	**Ступінь дроб-лення, штуки**	**Поту-жність, кВт**	**Міст-кість, т/год**	**Ступінь дроб-лення, штуки**	**Поту-жність, кВт**
МТПМ800	800	970	7	4〜8	37	14	10 〜12	37
МТПМ920	920	900	20	4〜8	90	25	10 〜12	75

Обладнання характеризується стабільною та надійною роботою при низькому енергоспоживанні, що робить його економічно ефективним для промислового використання. Завдяки зручній системі керування та простому обслуговуванню оператори можуть швидко налаштовувати параметри процесу та підтримувати його безперебійну роботу. Додатково вбудовані функції самозахисту забезпечують безпеку персоналу, запобігають можливим поломкам

і сприяють тривалій експлуатації обладнання навіть за інтенсивного виробництва.

9.11.6. Промивний циклон

Промивний циклон Myande призначений для ефективної екстракції рафінованого крохмального молока, а також для відновлення та концентрування крохмалю, включно з промиванням і обробкою крохмального молока у виробництві модифікованого крохмалю. Обладнання доступне у двох варіантах: горизонтальному та вертикальному. Горизонтальний тип зазвичай застосовується для невеликих або середніх виробничих потужностей, тоді як вертикальний промивний циклон оптимізований для великої продуктивності, з радіально розташованими трубами для кращого потоку матеріалу. Система промивання може мати 6, 9 або 12 ступенів з незалежною рециркуляцією води, що забезпечує ефективне протитечійне промивання, знижуючи витрати води. Усі поверхні, що контактують із продуктом, виготовлені з нержавіючої сталі, що гарантує гігієнічність і довговічність. Обладнання відзначається простотою встановлення, легкістю експлуатації та обслуговування, що робить його зручним для промислового використання.



Рис. 37. Промивний циклон Myande, Китай [37]

Таблиця 20 – Технічна характеристика

Модель	Потужність кукурудзи, т/добу	Потужність одного насоса, кВт	Тип
DXLD300	150-200	18,5	Горизонтальний
DXLD300x2	300-400	30	Горизонтальний
DXLD350x2	400-500	45	Горизонтальний
DXI D380x2	500-700	45	Вертикальний
DXLD440x2	700-800	55	Вертикальний
DXLD480x2	950-1050	75	Вертикальний
DXLD540x2	1000-1300	75	Вертикальний
DXLD600x2	1400-1600	110	Вертикальний

Промивний циклон Myande є високоефективним та надійним обладнанням для екстракції, промивання та концентрування крохмалю, забезпечуючи економію води та високу продуктивність. Простота конструкції, гігієнічність матеріалів і легкість у експлуатації роблять його оптимальним рішенням для промислових ліній виробництва крохмалю та модифікованих продуктів.

9.11.7. Флеш-сушарка

Сушарка Myande Flash широко використовується в легкій, хімічній та харчовій промисловості, а також у суміжних галузях. Вона особливо ефективна для сушіння термочутливих порошкоподібних або пластівчастих матеріалів, таких як крохмаль, білковий порошок, рисові висівки, карбонат кальцію, діатоміт, смоли, пігменти, глюкоза, тирса, оксид заліза та гідроксид алюмінію. Сушарка доступна в трьох варіантах: з негативним тиском, позитивним тиском та комбінованим позитивно-негативним тиском. Під час роботи вологі матеріали контактують із гарячим повітрям у сушильній трубі, забезпечуючи ефективний теплообмін та рівномірне висушування продукції.



Рис. 38. Флеш-сушарка Myande, Китай [38]

Сушарка забезпечує короткий час сушіння, низьке споживання пари та швидкий технологічний процес, одночасно гарантуючи високу ефективність і якість кінцевого продукту.

Таблиця 21 – Технічна характеристика

Модель	**Продуктивність, сухий крохмаль, т/год**	**Вологість вхідного вологого крохмалю, %**	**Вологість вихідного готового крохмалю, %**	**Витрата пари, кг пари/кг H_2O**	**Потужність, кВт**
MGZQ5	5	<40	12,0 – 14,0	1,7 – 1,9	143,5
MGZQ7	7				198,0
MGZQ10	10				207,0
MGZQ15	15				330,0
MGZQ20	20				418,0

Сушарка відзначається компактністю та економічністю, займаючи мінімум простору та знижуючи витрати, при цьому забезпечує універсальне застосування для сушіння різноманітних порошкоподібних і пластівчастих матеріалів.

9.11.8. Модифікований крохмалеварний апарат

Варильний апарат для модифікованого крохмалю Myande призначений для перетворення природного крохмалю на модифікований через процес денатурації, який відбувається під дією високої температури та кислотного або амілазного середовища. Конструкція передбачає підвісний головний вал, що зменшує накопичення матеріалу, а модульний кожух забезпечує рівномірний круговий рух гарячого середовища (теплопровідної олії) для рівномірного нагріву. Поєднання спірального стрічкового та центрального спірального перемішування гарантує якісне та однорідне перемішування матеріалу. Дистанційне керування нижніми розвантажувальними дверцятами дозволяє автоматично та повністю вивантажувати оброблений крохмаль.



Рис. 39. Модифікований крохмалеварний апарат Myande, Китай [39]

Варильний апарат Myande є ключовим обладнанням для виробництва модифікованого крохмалю, забезпечуючи ефективне перетворення природного крохмалю завдяки комбінації високої температури та кислотного або амілазного середовища. Конструкція з підвісним головним валом дозволяє зменшити накопичення матеріалу, а модульний кожух забезпечує рівномірний нагрів корпусу за рахунок циркуляції теплопровідної оливи. Спіральне стрічкове та центральне перемішування гарантують однорідність продукту та запобігають утворенню грудок. Дистанційне керування нижніми розвантажувальними дверцятами дозволяє автоматично та безпечно вивантажувати готовий продукт. У підсумку, апарат поєднує високу продуктивність, стабільну якість крохмалю, зручність у керуванні та енергоефективність, що робить його надійним рішенням для промислового виробництва модифікованого крохмалю.

9.11.9. Іонообмінна колона

Іонообмінна колона Myande широко застосовується для ефективної демінералізації та очищення різноманітних продуктів, включаючи цукрові спирти, такі як глюкоза, фруктоза та сорбіт, а також органічні кислоти, наприклад лимонну та молочну. Вона активно використовується у глибокій переробці крохмалю, у системах очищення води, у хімічній та фармацевтичній промисловості, забезпечуючи високу якість кінцевого продукту.

Катіонообмінна колона замінює катіонні домішки, такі як кальцій (Ca^{2+}), магній (Mg^{2+}), натрій (Na^{+}), а також невелику частину білкових компонентів на іони водню (H^{+}). Аніонообмінна колона, у свою чергу, видаляє аніонні домішки, включаючи хлориди (Cl^{-}), сульфати (SO_4^{2-}), нітрати (NO_3^{-}), а також кольорові домішки, замінюючи їх на гідроксидні іони (OH^{-}).

Для забезпечення різних потреб клієнтів і властивостей матеріалу доступні колони з різною конструкцією: з фіксованим шаром, повним шаром, змішаним шаром або імітовані безперервні системи. Використання високоякісного німецького дистриб’ютора KSH гарантує тривалий термін служби колони та

рівномірний ефект просіювання. Комбінована пастка для смоли запобігає втратам смоли, підвищуючи ефективність процесу.

Крім того, колона Myande оснащена повністю автоматичною системою управління, яка здійснює онлайн-моніторинг значень pH та електропровідності сиропу, що виходить, забезпечуючи стабільну якість продукту та надійну роботу обладнання протягом усього процесу.



Рис. 40. Іонообмінна колона Myande, Китай [40]

Іонообмінна колона Myande забезпечує ефективну демінералізацію та очищення цукрових спиртів і органічних кислот, широко застосовується у переробці крохмалю, хімічній та фармацевтичній промисловості. Катіоно- та аніонообмінні блоки видаляють небажані домішки, а різні конструкції колон дозволяють адаптувати обладнання під конкретні потреби. Автоматизоване управління, онлайн-моніторинг pH та електропровідності гарантують стабільну якість продукту та надійну роботу обладнання.

Питання для самоконтролю

1. З яких основних складових складається крохмаль?
2. Які існують класифікації крохмалю?
3. Що мається на увазі під безвідходними технологіями виробництва крохмалю?
4. Які характеристики притаманні наночастинкам крохмалю?
5. Яку роль відіграє штучний інтелект у виробництві нанокомпозитів із крохмалем?
6. Як нанокомпозити на основі крохмалю використовуються у промисловому виробництві?
7. У чому полягає біоактивність однонуклеотидних наночастинок?
8. Чи можна крохмаль комбінувати з іншими харчовими інгредієнтами для 3D-друку продуктів?
9. Як біосумісність і біорозкладність крохмалю впливають на процес інкапсуляції різних речовин?
10. Якими властивостями володіють біорозкладні плівки на основі крохмалю?
11. Які переваги дає використання штифтових млинів у виробництві крохмалю?
12. З якою метою застосовуються відцентрові сепаратори у виробництві крохмалю?
13. Для чого використовують гідравлічні шнекові преси?
14. Які особливості переробки крохмалю враховуються при використанні трубчастих сушарок?
15. За яким принципом функціонує флеш-сушарка?
16. Для чого застосовується іонообмінна колона у виробництві крохмалю?

Рекомендована навчальна література

1. Грабовська О. В. Технології крохмалю і крохмалепродуктів : підручник / О. В. Грабовська ; Нац. ун-т харч. технол. Київ : НУХТ, 2019. 315 с.
2. Бухкало С. І. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах (приклади та тести з технології крохмалю) : підручник. 2-ге вид., допов. Ч. 2. Київ : Центр навчальної літератури, 2019. 108 с.

3. Малишев В. В. Нанотехнології та наноматеріали у харчовій промисловості : навч. посіб. / В. В. Малишев, А. І. Українець, С. В. Габрик. Київ : НУХТ, 2018. 320 с.
4. Харчові технології : підручник : у 2 т. Т. 2 / В. А. Домарецький, М. М. Калакура, Л. М. Тележенко та ін. ; за ред. А. І. Українця. Київ : НУХТ, 2017. 611 с.
5. Технологічні комплекси харчових виробництв : навч. посіб. / В. І. Теличкун, О. М. Гавва, Ю. С. Теличкун та ін. Київ : Сталь, 2017. 456 с
6. Кучерук З. І. Використання полісахаридів рослинного і мікробного походження в технології безбілкового хліба : монографія / З. І. Кучерук, О. С. Цуканова. Харків : ХДУХТ, 2014. 131 с.
7. Харчова біотехнологія : підручник / Т. П. Пирог, М. М. Антонюк, О. І. Скроцька, Н. Ф. Кігель. Київ : Ліра-К, 2016. 408 с.
8. Тіхосова Г. А. Митний контроль та експертиза товарів : навч. посіб. / Г. А. Тіхосова, О. М. Вербицький, Є. О. Калінський. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2019. 312 с.
9. Технологічна експертиза харчової продукції : навч.-метод. посіб. / уклад.: В. М. Федорів, І. М. Кобаса, В. В. Дійчук. Чернівці : Чернівец. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2020. 182 с.
10. Процеси і апарати. Механічні процеси і технології надвисокого тиску : підручник / В. С. Бойко, К. О. Самойчук, В. Г. Тарасенко та ін. Мелітополь : Люкс, 2019. 273 с.
11. Starch: chemistry and technology / ed.: R. L. Whistler, J. N. BeMiller, E. F. Paschall. 3rd ed. San Diego : Academic Press, 2012. 894 p.

Розділ 10. ОСТАННІ ДОСЯГНЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ КРОХМАЛЮ ДЛЯ РІЗНОМАНІТНИХ ВИДІВ УПАКОВКИ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

10.1 . Мікроструктури крохмалю та фазові переходи

Крохмаль належить до найперспективніших природних полімерів завдяки своїй біорозкладності, великій наявності у природі та щорічній відновлюваності. Він є привабливою та економічною основою для створення нових біорозкладних полімерів, оскільки його можна обробляти на звичайному обладнанні для переробки пластмас, а вартість матеріалу залишається низькою. Розробка та застосування крохмальних біополімерів стають дедалі актуальнішими на тлі проблем з дефіцитом нафти та потреби зменшити негативний вплив на довкілля від використання нафтохімічних пластмас. У багатьох країнах вже запроваджуються законодавчі обмеження щодо одноразових пластикових виробів, що стимулює розвиток альтернатив на основі крохмалю. Сучасні комерційні продукти на основі крохмалю не тільки повністю біорозкладні, але й можуть бути придатними для годівлі тварин або навіть їстівними для людей. Крім того, дослідження унікальних мікроструктур різних типів крохмалю та їх багатофазних переходів під час термічної обробки поглиблює фундаментальні знання в полімерній науці, дозволяючи краще розуміти взаємозв'язок між структурою матеріалу, технологією обробки та його кінцевими властивостями.

Сучасні методи синтетичних полімерів досягли такого рівня розвитку, що дозволяють не лише формувати матеріали з точно контрольованою мікроструктурою, але й регулювати молекулярну масу та її розподіл, що забезпечує бажані механічні, фізико-хімічні та термостабільні властивості полімерів. Природний крохмаль, навпаки, має еволюційно сформовану мікроструктуру, що забезпечує оптимальне зберігання енергії в рослині, і ця структура значно складніша за синтетичні аналоги.

Крохмаль є полісахаридом, що синтезується рослинами як основне джерело резервної енергії. Він зберігається всередині клітин у вигляді гранул сферичної форми діаметром від 2 до 100 мкм. Кожна гранула має складну

внутрішню організацію, яка включає амілозу та амілопектин у різних пропорціях, що визначає фізичні та хімічні властивості крохмалю, такі як здатність до гелювання, набухання та кристалічність.

Для промислового використання крохмаль виділяють переважно з зернових культур — кукурудзи, рису, пшениці, а також із бульб, таких як картопля і касава (тапіока). Кожен вид сировини має свої особливості гранул, наприклад, картопляний крохмаль має великі овальні гранули з високою амілозою, тоді як кукурудзяний крохмаль характеризується меншими округлими гранулами з іншим співвідношенням амілози та амілопектину.

Розуміння мікроструктури крохмалю та взаємозв'язку між структурою гранул, хімічним складом і технологічними властивостями є критично важливим для ефективної промислової переробки. Це знання дозволяє оптимізувати процеси виробництва крохмалю, його модифікації та подальшого застосування у харчовій, фармацевтичній та біопластиковій промисловості.

Крохмаль є вуглеводним полімером, що складається з ангідроглюкозних одиниць, з'єднаних переважно α-d-(1→4)-глюкозидними зв'язками. Попередні дослідження показали, що крохмаль має гетерогенну структуру та містить два основні типи мікроструктур: лінійну та розгалужену. Лінійна форма, відома як амілоза, складається з послідовних α-1,4-зв'язаних глюкозних одиниць, тоді як розгалужена форма — амілопектин — має високо розгалужену структуру, де короткі ланцюги α-1,4-зв'язаних глюкозних одиниць з'єднані між собою через α-1,6-зв'язки. Деякі види крохмалю, такі як тапіока, містять амілопектин із довшими розгалуженнями, що впливає на фізико-хімічні властивості матеріалу.

Молекулярна маса амілози зазвичай становить приблизно 10^6, що у десять разів перевищує молекулярну масу звичайних синтетичних полімерів, таких як поліетилен (PE), поліпропілен (PP) або полістирол (PS). Молекулярна маса амілопектину ще більша і може досягати мільйонів, згідно з даними світлорозсіювальних вимірювань. Завдяки лінійній структурі амілози її поведінка подібна до властивостей синтетичних полімерів, тоді як висока молекулярна маса і розгалуженість амілопектину значно зменшують рухливість

полімерних ланцюгів, що призводить до формування матеріалу з дуже високою в’язкістю.

Таким чином, співвідношення амілози та амілопектину, а також їхня молекулярна структура визначають ключові фізико-хімічні властивості крохмалю, включаючи його здатність до гелювання, набухання та утворення в’язких розчинів, що є критично важливим для харчових та промислових застосувань.

Структура амілози та амілопектину безпосередньо визначає технологічні властивості крохмалю. Амілоза, завдяки своїй лінійності, утворює більш міцні гелі та менш в’язкі розчини, що робить її важливою для процесів, де потрібна стабільність форми, наприклад у виробництві желе та харчових плівок. Амілопектин із високим ступенем розгалуження здатний сильно набухати у воді та утворювати високов’язкі розчини, що підвищує здатність крохмалю до загущування та стабілізації емульсій. Співвідношення цих двох компонентів у крохмалі визначає його реакцію на термічну обробку, здатність до ретроградного розпаду та ефективність у різних харчових і промислових технологіях, що робить вибір типу крохмалю ключовим для досягнення бажаних властивостей кінцевого продукту.

Згідно з дослідженнями фізичних властивостей, більшість природних крохмалів мають напівкристалічну структуру. Рівень кристалічності зазвичай коливається в межах 20–45% і залежить від джерела сировини. Короткі розгалужені ланцюги амілопектину переважно відповідають за формування кристалічних областей, які представлені у вигляді подвійних спіралей довжиною приблизно 5 нм. В цих кристалічних ділянках сегменти амілопектину орієнтовані паралельно осі великої спіралі, що забезпечує стабільну внутрішню структуру. Співвідношення амілози та амілопектину визначається не лише видом рослинної сировини та віком крохмалю, а й може регулюватися шляхом термічної обробки, що дозволяє коригувати кристалічність та, відповідно, фізико-хімічні та технологічні властивості кінцевого продукту.

Мікроструктура крохмалю є унікальною завдяки його високій молекулярній масі та розвиненій системі водневих зв'язків. У процесі термічної обробки крохмалю відбувається комплекс взаємопов'язаних фізичних і хімічних змін, зокрема дифузія води, набухання гранул, желатинізація, частковий розклад, плавлення та подальша кристалізація. Центральним і визначальним етапом серед цих перетворень є желатинізація, оскільки вона безпосередньо пов'язана з перебігом інших процесів.

До настання желатинізації температура термічного розкладання крохмалю є нижчою за температуру його плавлення, що унеможливлює перероблення матеріалів на основі нативного крохмалю за допомогою традиційного обладнання для виробництва пластмас, зокрема екструдерів. Так званий термопластичний крохмаль являє собою саме желатинізований продукт.

У загальноприйнятому розумінні желатинізація — це незворотний процес руйнування кристалічної структури гранул крохмалю. Він супроводжується їхнім набуханням, плавленням природних кристалічних ділянок та молекулярною солюбілізацією полімерних компонентів. Багатостадійний характер желатинізації можна досліджувати різними аналітичними методами, такими як рентгенівська дифракція, поляризаційна мікроскопія, ЯМР-спектроскопія тощо, однак найпоширенішим методом її вивчення є диференціальна сканувальна калориметрія.

Желатинізований крохмаль під час зберігання або відпалу може зазнавати ретроградації чи рекристалізації, причому сформовані кристалічні структури відрізняються за будовою. Відомо, що під час нагрівання у водному середовищі кристалічна організація крохмальних гранул руйнується. Попередні дослідження показали, що в процесі желатинізації амілоза та амілопектин частково розділяються через їхню термодинамічну несумісність. Наявність води та дія зсувних напружень можуть посилювати це розділення. Водночас під час екструзійної обробки за низького вмісту вологи значна частина амілози залишається асоційованою з амілопектином.

Хоча подвійноспіральна кристалічна структура, сформована короткими розгалуженими ланцюгами амілопектину, руйнується в ході желатинізації, самі ланцюги зберігають певну впорядкованість і своєрідну «структурну пам'ять». Після деструкції кристалічних ділянок короткі розгалужені ланцюги можуть агрегувати з утворенням гелеподібних доменів на кінцях макромолекул. Такі домени переважно складаються з ланцюгів одного підланцюга. Міжмолекулярні взаємодії між цими гелевими утвореннями та надмолекулярними структурами значно слабші, ніж між довгими лінійними полімерними ланцюгами, що пояснюється малою довжиною сегментів (приблизно 4–6 залишків глюкози).

> **Кристали V-типу** — це специфічна форма кристалічної організації крохмалю, що утворюється переважно амілозою. Вони являють собою одинарні спіральні структури амілози, стабілізовані включенням низькомолекулярних сполук (наприклад, ліпідів, жирних кислот або інших «гостьових» молекул), які розміщуються всередині спіралі та формують так звані комплекси включення. Таким чином, кристали V-типу відрізняються від природних кристалічних форм крохмалю (A-, B- або C-типу) як за механізмом утворення, так і за просторовою будовою, і не мають відношення до електронних кристалічних систем.

Під час подальшого зберігання або відпалу желатинізований крохмаль поступово перекристалізовується, тобто ретроградує. Встановлено, що насамперед амілоза формує кристаліти V-типу з одинарною спіральною організацією. Желатинізований амілопектин спочатку перебуває в аморфному стані, однак із часом ступінь кристалічності зростає, і також відбувається формування структур V-типу, значною мірою за участю амілопектину.

10.2. Екструзійна обробка крохмалю

Екструзія є однією з найпоширеніших технологій переробки полімерних матеріалів, яка зазвичай базується на циклі «плавлення — формування — затвердіння». Проте під час екструзійної обробки крохмалю його гранули зазнають низки складних фазових перетворень, серед яких набухання, втрата

двопроменезаломлення, часткове плавлення та розчинення структурних компонентів.

За відсутності зсувних напружень термічна желатинізація визначається переважно вмістом води та температурою процесу. При температурах нижче 50 °C структура крохмальних гранул залишається відносно стабільною: макромолекули впорядковані у сферолітичні утворення та утримуються разом завдяки силам Ван дер Ваальса і водневим зв'язкам, оскільки кристалічні ділянки ще не зазнали руйнування.

Коли ж температура перевищує температуру желатинізації, водневі зв'язки послаблюються і руйнуються, а молекули води взаємодіють із гідроксильними групами полімерних ланцюгів крохмалю. Це спричиняє інтенсивне проникнення води в гранули, їх подальше набухання та поступове розчинення кристалічних областей.

Оскільки екструзійна обробка здійснюється за умов високих зсувних напружень і підвищеного тиску, желатинізація крохмалю може відбуватися навіть за низького вмісту вологи. Це пояснюється тим, що механічні сили зсуву фізично руйнують крохмальні гранули, полегшуючи проникнення води до внутрішніх ділянок макромолекул і прискорюючи їх гідратацію.

Насправді під час екструзії за низької вологості одночасно спостерігаються кілька процесів: часткова желатинізація, плавлення крохмалю та його фрагментація, що є наслідком механічної і термічної деструкції. Встановлено, що ступінь руйнування амілопектину зменшується зі зниженням швидкості обертання шнека та зі збільшенням температури процесу (приблизно 121–177 °C) або вмісту вологи (20–25%). Інші дослідження показали, що введення гліцерину як пластифікатора здатне зменшувати деградацію крохмалю під дією зсувних навантажень.

Через складність багатофазних перетворень крохмалю під час екструзії мікроструктура та механічні властивості матеріалів на його основі значною мірою залежать від обраних методів і умов обробки. Наприклад, дослідження показали, що при компресійному формуванні отримані матеріали виявлялися

відносно крихкими, оскільки кристалічні ділянки амілопектину у нативному порошку залишалися значною мірою незруйнованими.

Нативні крохмалі — це природні, необроблені форми крохмалю, які отримують із рослинної сировини, наприклад кукурудзи, пшениці, картоплі або рису.

У той час як наплавлення плівок із водних гелів спричинювало формування нової напівкристалічної структури, матеріали, отримані методом лиття під тиском, демонструють вищі механічні властивості завдяки збільшеному вмісту аморфної фази.

Насправді екструзійну обробку широко застосовують і для модифікації крохмалю, зокрема для щеплення та попередньої желатинізації. Особливо слід відзначити високу ефективність і прискорені швидкості реакцій модифікації в екструдері порівняно з традиційними періодичними методами.

10.3. Покращення продуктивності та зменшення витрат

Підвищення продуктивності та зниження витрат залишаються ключовими стратегіями для всіх типів матеріалів. Як і у випадку з полімерними матеріалами на основі нафтопродуктів, вироби з відновлюваних ресурсів рідко застосовуються у чистому вигляді. Насправді використання композитів на основі відновлюваних матеріалів має значно давнішу історію, ніж традиційних полімерів. Наприклад, у біблійній Книзі Вихід мати Мойсея виготовила ковчег із очерету, смоли та слизу — свого роду волокнисто-армований композит у сучасному розумінні матеріалознавства. Більше того, під час Опіумної війни понад 100 років тому китайці будували захисні споруди, використовуючи композитні матеріали, армовані мінеральними частинками, виготовлені з глютенового рису, цукру, карбонату кальцію та піску.

Змішування та компонування полімерів є одними з найпоширеніших методів модифікації властивостей матеріалів, оскільки вони дозволяють використовувати традиційні технології з невеликими витратами. Зазвичай мета приготування суміші з двох або більше полімерів полягає не у радикальній зміні

властивостей окремих компонентів, а у досягненні максимальної продуктивності комбінації.

Властивості крохмальних матеріалів можна суттєво покращити шляхом змішування з синтетичними полімерними матеріалами. Так, протягом 1970–1980-х років було розроблено різні суміші на основі крохмалю з поліолефінами. Однак ці комбінації не були повністю біорозкладними, через що переваги використання природного крохмалю втрачалися. У цій статті розглядаються полімерні суміші та композити, створені виключно з природної сировини.

9.3.1. Армування натуральними наповнювачами

Армування волокном є однією з найпоширеніших стратегій у розробці полімерних композитів і довело свою ефективність завдяки високим специфічним властивостям, таким як підвищена міцність, жорсткість та низька маса. Композити, армовані волокном, детально описані у численних дослідженнях і оглядах.

У контексті біорозкладних матеріалів натуральні волокна викликають особливий інтерес, оскільки вони не лише функціонально замінюють традиційні армувальні матеріали, а й мають додаткові переваги: нижчу щільність і покращену адгезію до полярних природних матриць, таких як крохмаль або білки. Крім того, натуральні волокна демонструють високий потенціал у поводженні з відходами завдяки своїй біорозкладності та значно меншому утворенню золи під час спалювання.

Крохмаль, армований целюлозними волокнами, є типовим прикладом природного полімерного композиту. Такі армовані матеріали поєднують переваги відновлюваності, біорозкладності, широкого спектра застосування та низької вартості, що зумовило їхню високу популярність протягом останніх двох десятиліть. Однією з основних цілей армування крохмальних матеріалів целюлозними волокнами є покращення механічних властивостей. Так, повідомлялося, що міцність термопластичного пшеничного крохмалю на розтяг збільшилася в чотири рази після додавання целюлозних волокон.

Для підвищення механічної міцності крохмальних матеріалів використовували різні натуральні волокна, зокрема сизаль, бавовну, бамбук, джут, солому, кенаф та деревину. У порівнянні з неорганічними наповнювачами, композити на основі природних волокон пропонують ряд переваг: відновлюваність, широкий вибір доступних наповнювачів, низьке енергоспоживання та вартість, низьку щільність, високу питому міцність і модуль пружності, ефективну звукоізоляцію, простоту обробки та відносно високу реакційну здатність поверхні. Різноманітні методи отримання таких композитів та відповідні продукти були розроблені та детально досліджені.

Нещодавно було повідомлено про створення композитних крохмальних плівок, армованих кукурудзяним або пшеничним лушпинням, а також абрикосовою та волоською горіховою шкаралупою — побічними продуктами харчових ресурсів твердої фази. Пшеничне лушпиння за своєю морфологією нагадує частинки целюлози неправильної форми, тоді як кукурудзяне лушпиння має переважно плоску форму. Обидва типи лушпиння характеризуються нерегулярною формою частинок, причому кристалічні ділянки добре помітні під поляризованим світлом.

Дослідження показали, що додавання таких твердих наповнювачів підвищує міцність матеріалів, як і очікувалося. Газобар'єрні властивості крохмальних плівок також покращуються за рахунок введення лушпиння з високою щільністю та кристалічністю, особливо кукурудзяного лушпиння завдяки його плоскій формі. Електронно-мікроскопічні спостереження підтвердили добру сумісність крохмалю з обома видами лушпиння, що пояснюється їхньою гідрофільністю та полярною поведінкою.

Зовсім недавно були розроблені крохмальні композити, у яких газопроникність плівки значно покращується за рахунок додавання лаверу (їстівних червоних водоростей). Було встановлено, що при введенні лаверу у холодну крохмалеву суспензію пластівці лаверу (волокнисті структури) виконують роль армуючого агента, що покращує механічні властивості крохмальної матриці, зокрема підвищує модуль пружності та міцність на розтяг.

Натомість при додаванні лаверу до гарячої крохмальної суспензії з подальшим змішуванням під дією зсувного напруження білки, що містяться в лавері, вивільняються та інтегруються з крохмалем, утворюючи гібридні композити крохмаль–білок–лавер. У такій гібридній системі волокно лаверу підвищує механічні властивості плівки приблизно на 25%, а білок знижує чутливість до вологи та газопроникність приблизно на 45%.

Скануюча електронна мікроскопія підтвердила добру сумісність крохмальної матриці з лавером. Оскільки всі компоненти походять із харчових джерел, отримані плівки безпечні для використання у харчовій упаковці та як їстівні плівки.

9.3.2. Нанокомпозити на основі крохмалю

Нанокомпозити на основі крохмалю продовжують привертати значну увагу, були успішно розроблені та навіть комерціалізовані. Однією з основних проблем при використанні наноглини є її розшаровування, оскільки між шарами можуть утворюватися перешкоди у вигляді заліза. Ще однією складністю є покращення взаємодії гідрофільної поверхні глини з гідрофобними полімерними матрицями, особливо поліолефінами.

У випадку матеріалів на основі крохмалю ці проблеми вирішуються значно легше. По-перше, гідрофільна вода ефективно сприяє розшаровуванню глини, а застосування ультразвукових коливань додатково підсилює цей ефект. По-друге, крохмаль сам по собі є гідрофільним полімером, який добре сумісний з глиною та водою. Крім того, вода виконує роль природного пластифікатора для крохмальних матеріалів, сприяючи їхній оброблюваності та формуванню нанокомпозитів.

Останнім часом кристали на основі полісахаридів, особливо нанорозмірні, привертають значну увагу як ефективні армувальні агенти для покращення механічних властивостей крохмальних матеріалів, оскільки вони забезпечують природно сумісний інтерфейс і всі компоненти є їстівними. Як целюлозні, так і

крохмальні нанокристали використовуються для підвищення міцності на розтяг і модуля Юнга крохмальних матеріалів.

Зокрема, повідомлялося, що целюлозні нанофібрили підвищують опір повзучості та знижують швидкість деформації крохмальної плівки під дією тривалого навантаження. Інші дослідження показали, що крохмальні плівки, армовані лише 7% нанокристалів целюлози, можуть досягати рівня міцності та жорсткості, близького до властивостей поліолефінових матеріалів.

Повідомлялося про створення їстівних крохмальних плівок, армованих як крохмальними, так і целюлозними макрокристалами. Такі плівки відрізнялися прозорістю та гладкою поверхнею. Додавання кристалів призвело до підвищення модуля Юнга та міцності на розрив, хоча дещо знизилося видовження при розриві.

Електронна мікроскопія підтвердила високу сумісність крохмальної матриці з обома типами кристалів завдяки наявності спільної хімічної одиниці — глюкози. Целюлозні кристали володіють високою термостабільністю, що забезпечує кращу технологічність і покращені механічні властивості порівняно з чистими крохмальними плівками. Натомість крохмальні кристали підвищують захист плівки від ультрафіолетового випромінювання.

Отримані плівки є не лише біорозкладними, а й безпечними для харчової упаковки. Крім того, вони можуть застосовуватися для виробництва їстівних плівок і лікарських капсул, оскільки всі компоненти походять із харчових джерел.

10.3.3. Самоармовані композити

Самоармовані композити, або однополімерні композити, у яких полімерна матриця армована орієнтованими волокнами, стрічками або частинками того самого полімеру, є перспективною концепцією. Основні переваги таких матеріалів включають здатність формувати ідеальні межі між компонентами композиту, зберігати чисту хімічну функціональність та підвищувати цінність

продукту для переробки завдяки його відносній однорідності порівняно з композитами, що складаються з різних класів матеріалів.

Особливо важливою ця однорідність є для біоматеріалів, оскільки введення сторонніх компонентів із різною хімічною природою може впливати на біосумісність та біорозкладність виробу.

Було розроблено унікальну методику проєктування та виготовлення самоармованих крохмальних плівок із застосуванням кукурудзяного крохмалю, модифікованого різними хімічними способами. Зокрема, гідроксипропілювання використовували для зниження температури желатинізації та покращення технологічної оброблюваності матеріалу. Зниження температури обробки пояснюється введенням заміщеної групи, яка ослаблює або створює напруження у внутрішній структурі зв'язків, що утримують гранули крохмалю разом.

Армуючий компонент складався із зшитих гранул крохмалю, при цьому зшивання підвищувало термостабільність і вологостійкість гранул, забезпечуючи покращені механічні та експлуатаційні властивості отриманих плівок.

Багато крохмальних матеріалів, армованих полісахаридними кристалами, також можна віднести до різновиду самоармованих композитів, оскільки їхні хімічні компоненти за своєю природою є подібними та забезпечують високий ступінь сумісності між матрицею та армуючими елементами.

10.3.4. Змішування з іншими природними полімерами

Крохмаль також застосовували для покращення технологічності та зниження вартості інших природних полімерів. У цьому контексті особливу увагу приділено сумішам гідрогелів. Наприклад, комбіновані плівки, що містять як полісахариди, так і білки, продемонстрували унікальні властивості, зокрема кращий газонепроникний бар'єр порівняно з будь-якою окремою плівкою.

Попередні дослідження показали, що желатин та крохмаль у чистому вигляді не утворюють однорідних сумішей. Водночас морфологія та сумісність

таких сумішей значною мірою залежать від умов обробки, зокрема часу та температури обробки, значення pH та концентрації твердих речовин у суспензії.

Були розроблені їстівні плівки шляхом змішування крохмалю з желатином. Складне питання сумісності цих двох компонентів було досліджено з урахуванням їхньої поверхні розділу фаз та фазового складу за допомогою синхротронної ІЧ-спектроскопії з перетворенням Фур'є.

Аналіз складу та поверхні розділу суміші за допомогою ІЧ-спектроскопії з перетворенням Фур'є дозволяє отримати унікальне уявлення про морфологію та характер взаємодії компонентів системи, оскільки метод спирається на хімічний контраст між крохмалем і желатином.

Іншим прикладом є суміші гідроксипропілметилцелюлози та гідроксипропілкрохмалю, які здобувають дедалі більшу увагу завдяки своїм унікальним термо- та холодоактивним гелевим системам і широкому спектру застосувань. Дослідження таких систем мають як наукове, так і комерційне значення.

З наукового боку, ці суміші слугують зручною моделлю для вивчення термо- або холодоактивних гелевих систем, оскільки дозволяють аналізувати реологічні властивості, фазові переходи, морфологію та сумісність компонентів. З комерційної точки зору, такі суміші застосовують у харчовій упаковці, виробництві лікарських капсул і навіть у тканинній інженерії хрящів.

Переважні властивості обох компонентів у цих сумішах частково поєднуються, що забезпечує добру технологічність, покращені механічні властивості та ефективні бар'єрні характеристики щодо кисню та водяної пари.

Дослідження показали, що в'язкість гідроксипропілкрохмалю була значно вищою, ніж у гідроксипропілметилцелюлози, а в'язкість сумішей поступово зростала зі збільшенням вмісту гідроксипропілкрохмалю при різних температурах. Як і очікувалося, в'язкість чистого гідроксипропілкрохмалю зменшувалася зі зростанням температури.

Водночас в'язкість чистої гідроксипропілметилцелюлози знижувалася при підвищенні температури нижче 50 °C, а в діапазоні 50–75 °C спостерігалося її

збільшення. Прийнятним поясненням термічного гелеутворення гідроксипропілметилцелюлози є те, що достатня енергія призводить до відриву зовнішніх шарів води від ланцюгів целюлозного ефіру, ланцюги блокуються та розчин перетворюється на гель.

10.3.5. Функціоналізовані композити

Для додання нових функцій та задоволення зростаючих потреб ринку були розроблені функціоналізовані матеріали на основі крохмалю. Особливо цікавим прикладом є використання шкірки граната як антимікробного та одночасно армуючого агента у крохмальних плівках. Дослідження попередніх робіт показали, що екстракт шкірки граната ефективно пригнічує ріст різних мікроорганізмів, проте пряме включення шкірки граната як наповнювача у плівки на основі крохмалю для створення антимікробних матеріалів раніше не повідомлялося.

Використання шкірки граната як наповнювача має кілька суттєвих переваг. По-перше, воно дозволяє здешевити виробництво матеріалів, оскільки шкірка є доступним побічним продуктом харчової промисловості. По-друге, шкірка граната покращує механічні властивості плівок: спостерігається підвищення модуля Юнга, міцності на розрив та жорсткості. Крім того, матеріал демонструє ефективність проти грампозитивних бактерій (S. aureus) та грамнегативних (Salmonella), що робить його перспективним для застосування у харчовій промисловості.

Дослідження інтерфейсу плівок показали гарну сумісність між крохмалем та частинками шкірки граната, що пояснюється їхньою хімічною спорідненістю: целюлозна основа шкірки добре взаємодіє з крохмальною матрицею. Завдяки цьому матеріал поєднує покращені механічні властивості, антимікробну активність та біосумісність.

Оскільки всі компоненти розроблених плівок є харчовими інгредієнтами, ці матеріали можна безпечно використовувати як їстівні плівки або пакувальні матеріали харчового класу. Крім того, їхня багатофункціональність відкриває

можливості для створення нових продуктів із подовженим терміном зберігання та підвищеним захистом харчових виробів від мікробного псування, що робить їх перспективними для комерційного використання у сучасній харчовій та фармацевтичній промисловості.

10.4. Зниження чутливості до вологи

Загально відомою слабкістю матеріалів на основі крохмалю є їхня висока чутливість до вологи. Гідроксильні групи крохмалю надають йому гідрофільних властивостей, що обмежує експлуатаційні характеристики матеріалу. Плівки з крохмалю за підвищеної вологості демонструють більшу проникність для водяної пари та знижену міцність на розтяг.

Для зменшення чутливості до вологи та покращення механічних властивостей крохмальних матеріалів розроблено різні методи змішування та компонування. Однак суміш, що містить крохмаль, не може стати гідрофобною, доки його вміст не зменшиться до рівня, при якому крохмаль утворює окрему доменну фазу у гідрофобній полімерній матриці; у такому випадку крохмаль виконує роль лише наповнювача.

Інші ефективні методи зниження вологочутливості включають поверхневе покриття та хімічне зшивання. Вони мають низку переваг: легкість обробки, менші витрати, можливість регулювання товщини покриття та максимальне використання природних властивостей матриці.

Зшивання крохмалю є поширеним підходом для покращення його характеристик і розширення сфери застосування. Для підвищення механічних властивостей та вологостійкості крохмальних матеріалів використовували різні зшиваючі агенти, такі як оксихлорид фосфору, триметафосфат натрію, триполіфосфат натрію, епіхлоргідрин, 1,2,3,4-діепоксибутан та лимонна кислота.

Однак більшість зшиваючих агентів додають безпосередньо до розчину крохмалю під час лиття плівки, що ускладнює застосування цього методу у промислових умовах, де крохмальні плівки або листи здебільшого виготовляють

методом екструзійного лиття. У цьому випадку більш придатними є методи поверхневого покриття або зшивання на готовій поверхні, які забезпечують сумісність із промисловою обробкою та дозволяють контролювати властивості кінцевого матеріалу.

Особливий інтерес викликають покриття на основі акрилованої епоксидованої соєвої олії, призначені для зниження вологочутливості та покращення бар'єрних властивостей крохмальних плівок. Для цього плівки на основі крохмалю спочатку занурювали в розчин акрилованої епоксидованої соєвої олії, а потім зшивали за допомогою ультрафіолетового опромінення.

Результати показали, що проникність водяної пари зменшувалася більш ніж у 10 разів після нанесення покриття, що суттєво знижувало чутливість плівок до вологості. Покриття діяло як гідрофобний шар, ефективно захищаючи крохмаль від взаємодії з водою. Дослідження показали, що щільність зшивання є одним із ключових факторів: навіть дуже тонкий шар акрилованої епоксидованої соєвої олії забезпечував добру водостійкість.

Крім того, оскільки соєва олія є відновлюваним ресурсом, аналогічно крохмалю, використання такого покриття робить плівку більш екологічною та придатною для стійких біоматеріалів із мінімальним впливом на довкілля.

Для покращення адгезії між крохмалем та покриттям на основі акрилованої епоксидованої соєвої олії, а також для зниження вологочутливості матеріалу, було використано поліетиленімін. Цей полімер сприяє зміцненню межі розділу між гідрофільною крохмальною матрицею та гідрофобним покриттям.

Результати ЯМР, ІЧ-спектроскопії з перетворенням Фур'є та рентгенівської фотоелектронної спектроскопії показали, що поліетиленімін ефективно взаємодіє з крохмальними плівками через водневі зв'язки та хімічно реагує з акрилованою епоксидованою олією за механізмом приєднання по Міхаелю. Сили взаємодії між крохмальною матрицею та покриттям оцінювали за допомогою випробувань на зсувну адгезію, які продемонстрували суттєве підвищення міжфазної адгезії після обробки поліетиленіміном.

Плівки на основі крохмалю, оброблені поліетиленіміном, майже повністю зберігали свою початкову механічну міцність після замочування у воді протягом більш ніж 3 годин. Ці результати підтвердили ефективність розробки нових водонепроникних матеріалів на основі відновлюваного та екологічно чистого крохмалю, а також успішне застосування акрилованої епоксидованої соєвої олії як функціонального покриття.

Спостереження показали, що руйнування покритих крохмальних плівок відбувалося переважно на межі між крохмальною матрицею та покриттям з акрилованої епоксидованої соєвої олії або всередині самої крохмальної плівки, але не на межі крохмальний клей/покриття. Після обробки поліетиленіміном зазор між крохмалем і покриттям значно зменшився, а міцність на зсув між крохмальною матрицею та акрилованим покриттям суттєво підвищилася. Це свідчить про ефективне зміцнення міжфазного з'єднання та покращення механічної стабільності плівок.

10.5. Піноутворення на основі крохмалю

Застосування крохмальної піни набуло особливої актуальності після введення нових заборон на одноразовий пластик у багатьох країнах. Піна на основі крохмалю здатна ефективно замінити численні види традиційних пластикових пінопластів. Було детально досліджено взаємозв'язок між фазовими переходами крохмалю та процесом піноутворення.

Особлива увага приділялася впливу вмісту води на температуру плавлення, кристалічність, піноутворення, структуру комірок і механічні властивості матеріалів. Вода одночасно виконує роль пластифікатора та пороутворювача. Було виявлено критичний вміст води (16–18%), при якому відбувається різка зміна коефіцієнта розподілу, пов'язана зі структурою комірок: вона переходить з відкритої на закриту.

При нижчому вмісті води температура плавлення матеріалу підвищується, а міцність плавлення знижується, що формує відкриту комірчасту структуру.

Вода в таких відкритих комірках випаровується під час спінювання, створюючи стабільну та жорстку структуру піни, оскільки недостатня міцність плавлення не дозволяє утримувати бульбашки.

Навпаки, при вищому вмісті води температура плавлення зростає, а міцність плавлення стає вищою, що сприяє збільшенню розмірів бульбашок і формує закриту коміркову структуру. У закритих комірках волога не випаровується, а пара конденсується при охолодженні. Конденсована волога розм'якшує стінки крохмальної комірки та створює негативний тиск всередині, що призводить до усадки піни.

З точки зору практичного застосування, для зниження витрат на транспортування пінопластових виробів виробництво було розділено на два етапи. Перший етап – це приготування гранул на основі крохмалю шляхом змішування компонентів, що дозволяє значно полегшити їх транспортування. Другий етап – спінювання виробів безпосередньо поблизу місця використання.

Такий підхід пояснюється тим, що спінені матеріали містять понад 90% газу, через що витрати на транспортування готових виробів можуть перевищувати вартість самих матеріалів. Гранули, навпаки, легко перевозити, і їх можна доставляти безпосередньо до місця замовника. Спінювання ж можна виконувати за допомогою невеликого одношнекового екструдера, що робить процес виробництва більш гнучким і адаптованим до потреб кінцевого споживача.

Матеріали на основі крохмалю демонструють значний потенціал, особливо в умовах, коли дедалі більше країн ухвалюють закони або постанови про заборону одноразового пластику. Було розроблено та комерціалізовано широкий спектр продуктів, таких як плівки, капсули, листи, пінопласт тощо. Як і для будь-яких інших матеріалів, основними стратегічними напрямками залишаються підвищення характеристик та зниження вартості.

У принципі, властивості крохмальних матеріалів можна значно покращити шляхом змішування із синтетичними полімерними матеріалами на основі нафти. Однак такі суміші не є біорозкладними, що призводить до втрати ключової

переваги використання природного полісахариду — його екологічної безпечності та здатності до біорозкладання.

Нанокомпозити на основі крохмалю продовжують привертати значну увагу, їх успішно розробляють і комерціалізують. Однією з основних проблем при використанні наноглини є її розшарування, що зумовлено наявністю меж між шарами. Іншою проблемою є покращення сумісності гідрофільної поверхні глини з гідрофобними поверхнями більшості традиційних полімерів, особливо поліолефінів.

У матеріалах на основі крохмалю ці проблеми можна ефективно вирішити. По-перше, вода, яка є гідрофільною, ефективно сприяє розшаруванню глини, особливо під впливом ультразвуку. По-друге, сам крохмаль є гідрофільним полімером, який добре сумісний із глиною та водою. Фактично, вода одночасно виступає як пластифікатор для крохмальних матеріалів, покращуючи їх оброблюваність та взаємодію з наповнювачем.

Крохмаль, армований целюлозою, є типовим прикладом природних полімерних композитів. Такі матеріали відзначаються рядом переваг: вони відновлювані, біорозкладні, доступні та економічно вигідні. Нещодавно були створені крохмальні плівки, армовані як целюлозними волокнами, так і крохмальними кристалами. Завдяки наявності спільної хімічної одиниці — глюкози — спостерігається висока сумісність між крохмальною матрицею та армуючими наповнювачами. Оскільки всі компоненти походять з харчових джерел, такі плівки є безпечними для упаковки продуктів харчування, біорозкладними, а також придатними для виготовлення їстівних плівок і лікарських капсул. Крім того, нові методи створення самоармованих композитів активно застосовуються для вдосконалення матеріалів на основі крохмалю.

Загальною слабкістю матеріалів на основі крохмалю є їхня висока чутливість до вологи. Гідрофільна природа крохмалю сприяє його поглинанню води, що призводить до зниження експлуатаційних характеристик, зокрема підвищеної проникності для водяної пари та зменшення міцності на розтяг. Для підвищення вологостійкості та покращення механічних властивостей

крохмальних матеріалів були розроблені різні методи змішування та компонування, проте найефективнішим і найпростішим підходом виявилася нанесення покриття.

Зокрема, для зменшення чутливості до вологи та покращення бар'єрних властивостей крохмальних плівок було застосовано покриття на основі акрилованої епоксидованої соєвої олії, яка сама по собі походить із відновлюваних ресурсів. Щоб підвищити адгезію між гідрофільним крохмалем і гідрофобним покриттям, а також ще більше зменшити чутливість плівки до вологи, використовували поліетиленімін. Ця добавка покращує зв'язок на межі розділу між крохмальною матрицею та акрилованою епоксидованою соєвою олією, забезпечуючи більш стабільну та стійку структуру матеріалу.

З практичної точки зору, для зменшення витрат на транспортування піноутворювальну систему в цьому дослідженні готували у два етапи: 1) компаундування компонентів і 2) спінювання готового виробу. Такий підхід обґрунтований тим, що спінені матеріали містять понад 90% газу, через що витрати на транспортування готової піни можуть перевищувати вартість самого матеріалу. Дослідження показали, що існує критичний вміст води (між 16 і 18%), при якому коефіцієнт розподілу газу змінюється істотно, оскільки структура комірок переходить з відкритої до закритої.

Виходячи з наведеного огляду, очевидно, що матеріали на основі крохмалю поєднують у собі як виклики, так і широкі можливості для розвитку. Майбутні дослідження будуть зосереджені на одночасному підвищенні експлуатаційних характеристик і зниженні вартості виробництва, з особливим акцентом на вирішенні добре відомої проблеми — високої чутливості крохмалевих матеріалів до вологи. При цьому важливо знайти оптимальний баланс між хімічною модифікацією для поліпшення водостійкості та збереження біорозкладності матеріалу. Крім традиційних застосувань у харчовій та пакувальній промисловості, крохмальні матеріали демонструють великий потенціал у таких сферах, як добрива з контрольованим вивільненням, очищення води, розробка нових лікарських форм та інші інноваційні напрями.

10.6. Інтелектуальна пакувальні плівкові матеріали на основі крохмалю

10.6.1. Біорозкладна упаковка

Від ферми до столу харчові інгредієнти та продукти часто піддаються зовнішнім пошкодженням або забрудненню, переважно через патогенні мікроорганізми та окислення, що негативно впливає на їхню якість. Тому необхідно застосовувати ефективні заходи для збереження початкових властивостей харчових продуктів. Одним із таких заходів є правильне пакування, яке допомагає підтримувати якість, запобігати псуванню, подовжувати термін придатності та зменшувати обсяг харчових відходів. Серед існуючих пакувальних матеріалів найбільш поширеним є пластик завдяки його низькій вартості, хорошим механічним властивостям та прийнятним бар'єрним характеристикам. Щороку у світі виробляють близько 300 мільйонів тон пластику, з яких близько 40% використовується для пакування. Водночас більшість пластикової упаковки не розкладається і стає серйозним джерелом забруднення довкілля. У зв'язку з цим активні дослідження та розробка екологічно безпечної харчової упаковки, яка могла б замінити традиційний пластик, набувають дедалі більшої актуальності.

В останні роки біорозкладна упаковка харчових продуктів стрімко розвивалася. З'явилися різноманітні технології деградації, включно з фоторозкладною та біорозкладною. Проте деякі біорозкладні матеріали виявляються токсичними або небезпечними для людини, і не всі вони підходять для харчової упаковки. Натомість повністю біорозкладні матеріали є оптимальним вибором для цього застосування. Функція біорозкладної пакувальної плівки така сама, як у звичайної: захищати якість харчових продуктів, полегшувати їхній обіг та підвищувати додану вартість. Наприкінці XX століття акцент досліджень перемістився від окремих біорозкладних плівок до створення повністю біорозкладних біоплівок. Сьогодні для виготовлення таких плівок використовують молекули з різних груп природних матеріалів:

полісахариди (крохмаль, хітозан, целюлоза), білки (сироватковий, соєвий, шовковий білок), ліпіди (бджолиний віск, лауринова кислота) та інші. Висока вартість виробництва та обмежене використання часто стримують масове застосування біорозкладних матеріалів у харчовій упаковці. Серед природних полімерів крохмаль виділяється як перспективний матеріал завдяки низькій ціні, великим запасам, їстівності та біорозкладності.

Крохмаль є основною формою зберігання вуглеводів у бульбах рослин та ендоспермі насіння, широко поширений у кукурудзі, картоплі, маніоці та зернових культурах. Він складається з двох основних компонентів: амілози та амілопектину. Амілоза утворює нерозгалужену спіральну структуру завдяки α-1,4-глікозидним зв'язкам, які з'єднані «кінець до кінця». Амілопектин має високо розгалужену структуру, утворену поєднанням α-1,4- та α-1,6-глікозидних зв'язків, і містить приблизно 24–30 залишків глюкози на гілку. Вміст амілози змінюється залежно від джерела рослини.

Проте використання натурального крохмалю в промисловості обмежене через його природні характеристики, такі як нерозчинність у холодній воді, гігроскопічність, нестабільна структура та схильність до деградації. Крім того, механічні властивості плівок з чистого крохмалю значно поступаються властивостям традиційних пластмас. Висока гідрофільність крохмалю, зумовлена великою кількістю гідроксильних груп, призводить до низької водостійкості та слабких механічних властивостей у вологому середовищі. Тому для практичного застосування пакувальних матеріалів на основі крохмалю необхідно покращити їхні механічні та бар'єрні характеристики.

Модифікація крохмалю або його суміш із різними матеріалами здебільшого використовується для вирішення зазначених проблем, пов'язаних із механічними та бар'єрними властивостями. З розвитком інтегрованих технологій переробки, транспортування та зберігання харчових продуктів постала потреба у більш тривалому терміні придатності та збереженні якості свіжих продуктів. Відповідно, зросли й вимоги до упаковки харчових продуктів.

Сучасна активна та інтелектуальна упаковка здатна не лише подовжувати термін придатності харчових продуктів, а й забезпечувати їхню безпеку та надавати інформацію про стан продуктів у ланцюжку постачання переробникам, роздрібним торговцям і споживачам.

Активна упаковка передбачає наявність у системі спеціальних активних компонентів (органічні кислоти, ферменти, бактеріоцини, натуральні рослинні екстракти тощо), які можуть поступово вивільнятися у харчовий продукт або його середовище. Це дозволяє подовжити термін зберігання продукту, підтримувати його якість, безпеку та сенсорні характеристики.

Інтелектуальна упаковка включає індикатори pH, датчики часу або температури та інші пристрої, що контролюють стан або цикл зберігання упакованих харчових продуктів і повідомляють споживачів про їхню якість. Такі матеріали можна застосовувати як наклейки на упаковку або безпосередньо інтегрувати у вигляді плівок.

У підсумку, поєднання активних та інтелектуальних функцій у пакуванні дозволяє не лише зберегти якість продукту, а й забезпечити більшу безпеку та інформованість споживача.

В останні роки більшість досліджень біорозкладних крохмальних плівок зосереджувалися на джерелах крохмалю, методах обробки та аналізі проблем і можливостей таких матеріалів. Проте досі відсутній систематичний огляд стану та застосування біорозкладних крохмальних плівок у контексті активної та інтелектуальної упаковки харчових продуктів.

У цьому огляді спочатку розглядається біорозкладність матеріалів на основі крохмалю та методи покращення механічних і бар’єрних властивостей плівок. Далі оцінюється активність крохмалю та підготовка інтелектуальної упаковки для моніторингу якості продуктів, забезпечення безпеки та подовження терміну їх зберігання. Окремо аналізується застосування крохмальних плівок як пакувальних матеріалів для консервації харчових продуктів.

Наприкінці обговорюються існуючі проблеми та окреслюються перспективні напрямки майбутніх досліджень. Розробка екологічно чистих,

безпечних і функціональних пакувальних матеріалів на основі крохмалю та їх практичне застосування для консервування харчових продуктів має велике наукове та практичне значення.

10.6.2. Біорозкладні плівкові матеріали на основі крохмалю

Біорозкладні пластики — це матеріали, здатні розкладатися місцевими мікроорганізмами за природних або спеціальних умов, у результаті чого утворюється екологічно чиста біомаса або малі нетоксичні молекули, такі як CO_2, CH_4 або H_2O. Серед таких матеріалів особливу популярність здобули біорозкладні полімери на основі крохмалю.

Крохмаль — природний полімер із групи полісахаридів, що переважно міститься в насінні, бульбах, коренях та плодах рослин. Сировина для виробництва крохмалю повинна характеризуватися високим вмістом крохмалю, легкою екстракцією, низькою вартістю обробки, зручністю зберігання та можливістю отримання побічних продуктів. Найчастіше для цих цілей використовують зернові культури, бульбоплоди та бобові, які містять значну кількість крохмалю.

Сучасні методи екстракції крохмалю включають лужний, ферментативний та метод із застосуванням поверхнево-активних речовин. Лужний та ферментативний методи базуються на дії лугу або ферментів, які гідролізують крохмаль у поєднанні з білками та целюлозою, сприяючи його виділенню та підвищенню виходу. Метод із поверхнево-активними речовинами передбачає використання, наприклад, алкілбензолсульфонату натрію в комбінації з білком, що дозволяє утворювати комплекс між білком і крохмалем та забезпечує ефективне розділення для екстракції.

Властивості крохмалю залежать від сорту рослини, клімату, ґрунту та інших умов вирощування. Вміст крохмалю варіює від понад 70% у зернових культур до 36–47% у сушених бобах. У картоплі крохмалю близько 14,7%, тоді як у зелених листових овочах його менше 0,2%.

Дослідження та розробки біорозкладної упаковки на основі крохмалю розпочалися у 1980-х роках і швидко розвивалися протягом наступного десятиліття. Приблизно через 10 років було виявлено, що в так званих біорозкладних плівках розкладається лише крохмальний компонент, тоді як інші матеріали плівки залишаються у вигляді фрагментів у ґрунті та воді, продовжуючи завдавати шкоди довкіллю. Це спонукало до розробки повністю деградованих матеріалів.

Біорозкладні матеріали на основі крохмалю проходять три етапи розвитку:

Крохмаль-наповнені пластмаси — полімерна матриця переважно складається з синтетичних поліммерів із додаванням крохмалю.

Змішані крохмальні пластмаси — матриця містить більшу частку крохмалю, змішану з іншими біорозкладними або синтетичними компонентами.

Повністю крохмальні пластмаси — матеріали складаються майже виключно з крохмалю, що забезпечує повну біорозкладність.

Еволюція крохмальних пластмас супроводжується збільшенням вмісту крохмалю. Повністю крохмальні пластмаси мають переваги: вони повністю біорозкладні, можуть виготовлятися із широкого спектра сировини та є економічно вигідними, що робить їх ключовим напрямком у розвитку матеріалів на основі крохмалю.

Пластики, наповнені крохмалем, виготовляють шляхом змішування невеликої кількості природного або модифікованого крохмалю з поліетиленом чи іншими термопластичними полімерними матрицями, а також додавання відповідних функціональних добавок. Головною метою цього підходу є підвищення біорозкладності традиційних пластикових матеріалів на основі нафти. Проте навіть за таких умов їх розкладання займає кілька років, і вони не досягають повної біорозкладності.

Змішані крохмальні пластмаси виготовляють шляхом поєднання крохмалю з синтетичними смолами або іншими природними полімерними матеріалами. Зазвичай такі суміші містять 30–60% крохмалю або модифікованого крохмалю та синтетичні біорозкладні полімери, що робить їх повністю біорозкладними та

екологічно безпечними. Порівняно з чисто синтетичними полімерами, ці суміші швидше розкладаються та демонструють покращені механічні властивості. Проте додані синтетичні смоли або інші природні полімери здебільшого є полярними і гідрофільними, тому тривалий контакт з водою може суттєво погіршувати характеристики пластику. Додатковою проблемою залишається сумісність між крохмалем та такими добавками, що ускладнює отримання однорідних і стабільних матеріалів.

Усі крохмальні пластмаси, відомі також як термопластичні крохмальні матеріали, є природними полімерними біорозкладними матеріалами. Вони виготовляються шляхом додавання біорозкладних пластифікаторів та інших добавок із застосуванням таких технологій, як екструзія, лиття під тиском, видувне лиття та каландрування, що призводить до «невпорядкованого» розташування молекул крохмалю. Вміст крохмалю у цих матеріалах перевищує 90%, а додані незначні кількості добавок є нетоксичними та повністю біорозкладними. Завдяки цьому всі крохмальні пластмаси є повністю біорозкладними. Крім того, більшість сучасних методів переробки пластмас можуть бути застосовані і до крохмальних пластмас, що робить їх зручними для промислового виробництва та повторного використання.

Зростаюче використання біорозкладних матеріалів на основі крохмалю в упаковці харчових продуктів забезпечує численні переваги, зокрема зменшення залежності від нафтопродуктів, екологічну безпечність, а також підвищення надійності та безпеки упаковки. Попри ці переваги, біорозкладні пластики наразі становлять менше 1% від загального світового виробництва пластику. Основними факторами обмеженого застосування є високі виробничі витрати та недостатні механічні й бар’єрні властивості порівняно з традиційними упаковковими матеріалами. У зв’язку з підвищенням вимог до пакувальних плівок, особливо перспективною є розробка багатофункціональних крохмальних плівок з антибактеріальними, антиоксидантними та іншими корисними властивостями, що поєднують покращені механічні та бар’єрні характеристики з додатковою функціональністю.

10.7. Механічні властивості плівок на основі крохмалю

Надійні механічні властивості є критично важливими для практичного використання пакувальних матеріалів у харчовій промисловості. Проте, у порівнянні з традиційними пластиками, біорозкладна упаковка на основі крохмалю демонструє суттєві недоліки через обмежену міцність і гнучкість, що значно обмежує її застосування для пакування харчових продуктів та інших товарів. Високі механічні характеристики дозволяють упаковці ефективно захищати продукт, зменшувати пошкодження під час транспортування та експлуатації, а також підвищувати конкурентоспроможність матеріалу у порівнянні з традиційними пластиковими упаковками. Саме тому покращення механічних властивостей плівок на основі крохмалю є важливим завданням для розвитку біорозкладних пакувальних матеріалів.

Дослідження показали, що подовження плівок на основі крохмалю негативно корелює з вмістом амілопектину, коли концентрація крохмалю коливається від 6,3% до 25,0%. Натомість міцність на розтяг позитивно корелює з вмістом амілози, який може досягати 40%. Було порівняно крохмаль касави та крохмаль машу з вмістом амілози 26% та 33% відповідно, і виявлено, що пікове подовження та подовження при розриві плівок з крохмалю машу були на 11% та 50% вищими порівняно з плівками з крохмалю касави. Також виготовлено плівки з крохмалю, виділеного з плодів гарбуза, сочевиці та насіння кіноа, і проведено порівняння з плівками з картопляного крохмалю. Результати показали, що міцність на розтяг становила 8,98–13,85 МПа, а подовження при розриві – 3,35–4,44%. Усі тонкі плівки демонструють безперервну пружність та класичну пружну поведінку без ознак крихкого руйнування.

Хоча плівки з чистого крохмалю демонструють механічні властивості, які можна варіювати шляхом підбору різних видів крохмалю, вони все ж не відповідають вимогам упаковки харчових продуктів. Наразі для покращення механічних властивостей крохмальних плівок застосовують хімічну та фізичну модифікацію крохмалю. Так, Да й Чжан досліджували вплив різних методів

модифікації на механічні властивості плівок з крохмалю. Їхні результати показали, що плівки зі зшитого крохмалю касави мають комплексні властивості, які перевищують характеристики інших модифікованих плівок з цього крохмалю.

Молекули зшитого крохмалю збільшують молекулярну масу крохмалю та посилюють міжмолекулярні взаємодії, що сприяє підвищенню міцності на розтяг. Додавання целюлозних нановолокон також покращує міцність на розтяг та модуль Юнга крохмальних плівок. Поверхня нановолокон целюлози містить численні гідроксильні групи, які взаємодіють з молекулами крохмалю, формуючи щільну сітчасту структуру.

У одному з досліджень до плівки з крохмалю касави додали лігноцелюлозу. Порівняно з контрольною групою, міцність на розтяг зросла до 6,6 МПа, що відповідає збільшенню на 37,5%, тоді як подовження при розриві знизилося до 44,43% порівняно з 54,92% у контрольній плівці. Це демонструє, що армування целюлозою або лігноцелюлозою значно покращує механічну міцність плівок, хоча іноді зменшує їх еластичність.

Крім того, крохмаль можна піддавати підкисленню та гідролізу для отримання нанокристалів, що дозволяє покращити механічні властивості матеріалу. Було встановлено, що природні кристали крохмалю не підвищують твердість і міцність на розрив екструдованих плівок. Натомість пластифікований крохмаль, отриманий шляхом перекристалізації V- та B-крохмалю, завдяки комплексному ефекту підвищує міцність на розрив, хоча й зменшує подовження при розриві.

Дослідники також гідролізували воскоподібний кукурудзяний крохмаль за допомогою натрію H6-метафосфату або глутарової кислоти для отримання зшитих модифікованих нанокристалів крохмалю. Результати показали, що додавання таких зшитих нанокристалів до плівок на основі крохмалю значно підвищує міцність на розрив та подовження при розриві, тоді як модуль Юнга залишається практично незмінним. Це демонструє ефективність нанокристалів

крохмалю у покращенні механічних характеристик плівок без втрати їхньої жорсткості.

10.8. Гідрофобні та бар'єрні властивості плівок на основі крохмалю

Однією з ключових функцій харчової упаковки є забезпечення стабільності продуктів та подовження їхнього терміну придатності. У цьому контексті бар'єрні властивості пакувальних матеріалів відіграють вирішальну роль, оскільки вони безпосередньо впливають на швидкість погіршення якості продуктів. Матеріали на основі крохмалю мають високу проникність для малих молекул, таких як гази та водяна пара. Відповідно, ефективність бар'єрних властивостей біорозкладних крохмальних матеріалів визначає їх придатність для використання у харчовій упаковці.

10.8.1. Пароізоляція

Псування харчових продуктів тісно пов'язане з вологістю навколишнього середовища, тому бар'єрні властивості щодо водяної пари є ключовими для збереження та подовження терміну придатності продуктів. Різні продукти мають різні вимоги до цього бар'єру: свіжі продукти потребують запобігання зневодненню, тоді як для хліба чи варених страв необхідно обмежити проникність водяної пари.

Матеріали на основі крохмалю багаті на гідроксильні групи та є гідрофільними, тому вони чутливі до вологи. У поєднанні з пластифікаторами, такими як гліцерин, розширення крохмальної мережі дозволяє утримувати велику кількість води, що руйнує структурну цілісність матриці, погіршує бар'єрні властивості та обмежує сферу застосування плівки в захисній упаковці.

Для підвищення гідрофобності крохмалю дослідники застосовували різні хімічні модифікації: естерифікацію, етерифікацію, зшивання та прищеплення гідрофобних груп, що зменшує кількість гідрофільних гідроксильних груп у молекулах крохмалю. Так, синтезували змішану плівку шляхом екструзійного змішування протозірок, ацетильованого крохмалю, октенілсукцинату крохмалю

та гідроксипропілкрохмалю з полібутилен-адипаттерефталатом. Результати показали, що гідрофобний крохмаль покращує сумісність та взаємодію з полібутилен-адипаттерефталатом і підвищує бар'єрні властивості до 82–89%.

Водночас слід зазначити, що модифікація крохмалю сама по собі не є достатньою для досягнення оптимальних характеристик матеріалу; для подальшого підвищення бар'єрних та механічних властивостей необхідне поєднання з іншими стратегіями, такими як формування композитів або нанесення зовнішніх покриттів.

На противагу простій модифікації, синергетична композитна модифікація крохмалю дозволяє підвищити ефективність змін і значно покращити водостійкість матеріалів на його основі. Досліджували вплив як окремих, так і бінарних комбінацій модифікованих крохмалів — зокрема оксид гідроксипропілкрохмалю, ацетилфосфат дикрохмалю та окислений ацетилкрохмаль — на гідрофобні властивості інтелектуальних плівок. Результати показали, що плівка з подвійно модифікованого крохмалю касави демонструє значно кращу стійкість до води та проникності водяної пари порівняно з плівкою, виготовленою з натурального крохмалю касави. Такий підхід підтверджує ефективність комбінованих модифікацій для підвищення бар'єрних властивостей крохмальних пакувальних матеріалів.

Окрім прямої модифікації крохмалю, його водостійкість можна значно покращити шляхом композитного змішування з гідрофобними речовинами. До таких добавок належать ліпіди, гідрофобні наночастинки, біоматеріали та їх похідні, які вносять у крохмальні плівки для підвищення гідрофобності.

Ліпіди, наприклад, можуть утворювати подвійний шар на вже сформованій плівці крохмалю або вводитися в розчин крохмалю у вигляді емульсії, створюючи композитні крохмаль-ліпід плівки. Дослідження показали, що різні ліпіди (олеїнова кислота, пальмова олія та маргарин) та їх концентрація впливають на проникність водяної пари плівок рисового крохмалю: додавання ліпідів знижує проникність, причому олеїнова кислота демонструє найвищу ефективність зі збільшенням її вмісту.

Крім того, гідрофобні полімери, такі як карбоксиметилцелюлоза, у поєднанні з кукурудзяним або маніоковим крохмалем підвищують водовідштовхувальні властивості плівок — до 48% та 40% відповідно. Цей ефект пояснюється взаємодією гідроксильних груп крохмалю та карбоксильних груп карбоксиметилцелюлози, що особливо помітно у плівках з високим вмістом амілози.

Наночастинки також є потужними агентами для підвищення гідрофобності. Додавання ZnO, TiO_2, SiO_2 або наноглини покращує водостійкість крохмальних плівок. Наприклад, плівки з картопляного крохмалю, леговані наночастинками SiO_2 різного розміру, показали покращення водовідштовхувальних властивостей. Використання ZnO наночастинок з ультразвуковою та магнітною обробкою під час формування плівки призвело до значного збільшення кута контакту з 85,73° до 121,45°, що свідчить про значне підвищення гідрофобності.

Ці підходи підтверджують, що комбінація крохмалю з гідрофобними матеріалами та наночастинками є ефективним методом для створення водостійких біорозкладних плівок.

10.8.2. Кисневий бар'єр

Проникнення кисню значно впливає на якість упакованих харчових продуктів через ріст аеробних мікроорганізмів та хімічне псування харчових інгредієнтів. Щоб підвищити бар’єрні властивості крохмальних матеріалів щодо малих молекул кисню, у процесі їх приготування зазвичай додають спеціальні наповнювачі, формуючи композитний матеріал, який складається з крохмальної матриці та начинки. У результаті утворюються крохмальні композити з підвищеними бар’єрними властивостями. На відміну від молекул крохмалю, структура наповнювача більш стабільна та щільна, тому малі молекули масопереносу, зокрема кисню, не можуть легко проходити через неї, що покращує бар’єрні властивості композитних плівок.

Поєднання наночастинок із крохмалем виявилося ефективним способом підвищення бар'єрних властивостей крохмальних матеріалів, що обмежують проникнення кисню. Зокрема, термопластичний крохмаль використовували як сировину для виготовлення композитних крохмальних плівок методами екструзії та видувного формування з додаванням нітриту та полібутилендіакрилату (PBAT). Результати показали, що нітрит модифікував карбонільні групи PBAT, покращив його сумісність з мережею термопластичного крохмалю, ущільнив мікроструктуру та знизив проникність кисню. Додавання 5% нітриту до системи PBAT/термопластичний крохмаль ефективно забезпечує проникність кисню на рівні високобар'єрних пластмас, виготовлених на основі викопного палива.

Також були отримані гібридні нанокомпозитні плівки крохмалю та поліакрилової кислоти, посилені наноглиною, у водному розчині за допомогою технології полімеризації in-situ. Дослідження показали, що стійкість цих плівок до проникнення кисню значно зростає під час процесу завантаження наноглини.

Крім того, виготовлено нанокомпозитні плівки крохмаль/полівініловий спирт/глина методом екструзійного видувного формування. Порівняно з плівками крохмаль/глина, проникність кисню плівок з 50% вмістом полівінілового спирту знизилася приблизно на 210%. Автори досліджень також запропонували механізм безперервного фазового переходу для пояснення покращених бар'єрних властивостей. Ці результати свідчать, що нанокомпозитні плівки крохмаль/полівініловий спирт/глина є перспективним матеріалом для харчового пакування з високими бар'єрними характеристиками.

10.9. Активні плівки на основі крохмалю

Окислення та мікробне забруднення залишаються основними факторами псування харчових продуктів, що суттєво обмежує їх термін зберігання та безпечність для споживача. У цьому контексті крохмальні упаковки привертають увагу як перспективна альтернатива традиційним пластиковим матеріалам, оскільки вони виготовляються з відновлюваної сировини та є

біорозкладними. Проте сама по собі крохмальна плівка не здатна ефективно запобігати псуванню продуктів, оскільки її бар'єрні властивості щодо кисню та мікроорганізмів обмежені.

Для підвищення функціональності таких упаковок у крохмальні матриці зазвичай додають антиоксиданти та антимікробні агенти. Ці речовини можуть поступово вивільнятися з матриці плівки, забезпечуючи активний захист продуктів від окислювальних процесів та мікробного росту. Такий підхід дозволяє не лише покращити якість харчових продуктів, але й істотно продовжити їхній термін придатності, що робить його предметом активних наукових досліджень.

Ефективність антиоксидантної або антимікробної активності плівки визначається низкою факторів. По-перше, джерело активних компонентів, їх хімічна природа та стабільність впливають на швидкість і тривалість вивільнення. По-друге, умови екстракції та концентрація доданих речовин визначають насиченість матриці активними агентами. По-третє, взаємодія між активними речовинами та крохмальною матрицею, включно з можливим формуванням ковалентних або водневих зв'язків, може модифікувати фізико-хімічні властивості плівки та її мікроструктуру. Саме мікроструктура, включно з щільністю та розподілом пор, безпосередньо впливає на здатність плівки утримувати та контролювати вивільнення активних компонентів.

Таким чином, розробка крохмальних плівок із вбудованими антиоксидантами або антимікробними агентами є перспективним напрямком у пакувальній індустрії. Вона поєднує екологічність матеріалу з активним захистом продуктів, забезпечуючи продовження їхнього терміну придатності та збереження поживної та сенсорної якості протягом зберігання.

10.9.1. Плівки на основі крохмалю з антиоксидантно активним складом

Антиоксидантні активні плівки здатні забезпечувати захист харчових продуктів від окислення шляхом введення антиоксидантів у пакувальний

матеріал. Ці речовини уповільнюють або запобігають окисним процесам у продуктах. Коли харчові продукти упаковують у такі матеріали, антиоксиданти поступово вивільняються всередину упаковки, продовжуючи термін придатності та частково зберігаючи якість продуктів.

У харчовій упаковці використовуються різні антиоксиданти, які поділяють на натуральні та синтетичні. Вважається, що синтетичні антиоксиданти можуть нести потенційні ризики для безпеки, тому сучасні дослідження зосереджуються на натуральних екстрактах, таких як ефірні олії та спеції.

Методи застосування антиоксидантів у пакуванні різняться. До них належать абсорбційна упаковка, де антиоксиданти додають безпосередньо до матеріалу, абсорбційна O_2-упаковка для запобігання окислювальному прогірканню, а також упаковка, яка забезпечує дифузію антиоксидантів на поверхню продукту або в середовище упаковки. Такі підходи перешкоджають окисленню продуктів, роблячи їх більш безпечними та стійкими під час зберігання. У той же час фіксовані типи плівок можуть лише утримувати антиоксиданти на поверхні, що безпосередньо контактує з продуктом.

Окислювальна деградація є однією з основних немікробних причин псування харчових продуктів. Запобігання окисленню є ключовим для збереження якості таких продуктів, як свіжі овочі та фрукти, оброблені харчові вироби та свіже м’ясо. Використання активних плівок з антиоксидантними властивостями дозволяє стримувати окислювальне псування, завдяки поступовому вивільненню активних антиоксидантних речовин під час зберігання. Антиоксиданти, залежно від їх джерела, поділяються на синтетичні та природні.

Синтетичні антиоксиданти, такі як бутилгідрокситолуол (BHT) та бутилгідроксианізол (BHA), широко використовуються в харчовій упаковці для запобігання окисленню ліпідів. Проте останнім часом зростає попит на натуральні антиоксиданти через потенційну токсичність і канцерогенність синтетичних сполук. До натуральних антиоксидантів належать поліфеноли,

токофероли, рослинні екстракти та ефірні олії, які є безпечнішою та ефективною альтернативою для додавання в активні пакувальні матеріали.

Наприклад, додавання 20% екстракту шкірки ананаса до плівки на основі полівінілового спирту та кукурудзяного крохмалю показало значне підвищення антиоксидантної активності. Контрольна плівка не проявляла антиоксидантної активності, тоді як плівка з 20% екстракту шкірки ананаса демонструвала поглинання радикалів DPPH (2,2-дифеніл-1-пікрилгідразил) приблизно на рівні 42%.

> **2,2-дифеніл-1-пікрилгідразил (DPPH)** – це стабільний вільний радикал, який широко використовується в лабораторіях для оцінки антиоксидантної активності речовин, а також як стандарт у методах електронного парамагнітного резонансу. DPPH має темно-фіолетовий колір і при взаємодії з антиоксидантами, що віддають водень, перетворюється на безбарвну або світло-жовту форму. Ця реакція дозволяє кількісно визначати здатність речовин нейтралізувати вільні радикали та їх антиоксидантну активність.

Інші дослідники виготовили окислені картопляні плівки, насичені натрієвим аскорбатом. При концентрації аскорбат-іонів 100 мМ активність плівок щодо стійкості до окислення та їх антирадикальна активність була у 7 та 20 разів вищою відповідно, порівняно з контрольним зразком.

Завдяки своїй леткості, леткі антиоксиданти в пакувальних матеріалах ефективніше запобігають окисленню харчових продуктів, ніж нелеткі сполуки. Ефірні олії, як приклад летких антиоксидантів, широко застосовуються у крохмальних плівках для посилення їх антиоксидантних властивостей. Було проаналізовано антиоксидантну активність плівок на основі кукурудзяного крохмалю, доповнених ефірною олією багатоквіткової кукурудзи та циннамальдегідом у вигляді звичайних, нано- та покращених наноемульсій. Результати показали, що плівки з крохмалю, що містили наноемульсію, мали вищу антиоксидантну активність порівняно з традиційними контрольними зразками.

У таких плівкових матеріалах пари ефірної олії дифундують у внутрішню атмосферу упаковки і безпосередньо взаємодіють з харчовим продуктом,

створюючи антиоксидантний захист. Це робить їх перспективними для застосування в харчовій пакувальній промисловості, особливо для м'яса та м'ясних продуктів, схильних до швидкого псування. Водночас ефективність крохмальних плівок із наночастинками ефірної олії у різних харчових системах потребує подальших досліджень для оптимізації складу та технології виготовлення.

10.9.2. Антибактеріальні плівки на основі активного крохмалю

Ріст мікроорганізмів у харчових продуктах призводить до їх псування, знижуючи харчову цінність та безпеку продуктів. Подібно до традиційних нафто-базованих упаковок, плівки на основі модифікованого крохмалю мають гарні фізико-механічні властивості для харчової упаковки, проте їх антибактеріальна активність зазвичай низька.

Підвищити антимікробні властивості крохмальних плівок можна завдяки водневим зв'язкам, електростатичним взаємодіям та іншим взаємодіям між функціональними групами крохмалю та антибактеріальними речовинами. На відміну від прямого додавання антимікробних агентів у харчові продукти, створення антимікробної плівки дозволяє запобігати псуванню продуктів шляхом контрольованого контакту активної речовини з їжею. Під час зберігання активні компоненти поступово вивільняються, ефективно пригнічуючи ріст бактерій навколо продукту.

В залежності від потреб користувача, пакувальні матеріали на основі крохмалю можуть бути модифіковані шляхом введення відповідних активних речовин. Антибактеріальні агенти, що додаються до плівок, зазвичай класифікують на натуральні, неорганічні та органічні сполуки, які забезпечують різні механізми дії проти мікроорганізмів.

Натуральні антибактеріальні матеріали переважно походять із тваринних і рослинних джерел, а також від мікроорганізмів та їх похідних. Серед поширених матеріалів – ефірні рослинні олії, хітозан, антимікробні пептиди та інші, які

проявляють бактерицидну дію: вони вивільняють активні речовини, що змінюють проникність клітин мікроорганізмів та пригнічують їх ріст.

Наприклад, було вивчено ефект збереження свіжості замороженої риби при використанні плівки з рисового крохмалю, доповненої ефірною олією листя орегано. Результати показали, що така композитна плівка має виражену антибактеріальну активність порівняно з контрольною групою та подовжує термін придатності рибного філе.

Інший приклад – плівки, виготовлені з маніокового крохмалю та хітозану методом розплаву та компресійного формування. Виявлено, що такі плівки зменшують кількість коліформних бактерій та загальне споживання кисню замороженими шматочками свинини, одночасно подовжуючи термін придатності продукту.

Хоча дослідження природних антибактеріальних плівок на основі крохмалю зростає завдяки їх екологічності, безпечності, широкому спектру дії та хорошій біосумісності, слід враховувати також проблеми низької хімічної стабільності та високої вартості екстракції натуральних антибактеріальних компонентів.

Органічні антимікробні засоби, які знаходять практичне застосування, включають четвертинні амонієві солі, поліфеноли, піридин та інші сполуки. Вони знищують бактерії завдяки електростатичній адсорбції, проявляють високий антибактеріальний ефект і є порівняно недорогими. Проте ці органічні агенти не отримали широкого застосування через високу токсичність і ризик розвитку стійких до ліків бактерій при надмірному використанні.

Неорганічні антимікробні засоби здебільшого включають металеві сполуки, які користуються популярністю завдяки широкому спектру дії та високій ефективності проти мікроорганізмів. Саме їхні властивості зробили металеві антимікробні агенти одним із провідних напрямків сучасних досліджень у сфері пакувальних матеріалів.

Неорганічні антимікробні агенти зазвичай представлені нанометалевими матеріалами, такими як срібло (Ag) та мідь (Cu), або фотокаталітичними

агентами, такими як діоксид титану (TiO_2) та оксид цинку (ZnO). Вони здатні міцно взаємодіяти з активними ферментними центрами бактерій. Іони металів, що вивільняються з неорганічних антимікробних матеріалів у певних умовах, можуть взаємодіяти з атомами азоту та кисню у білках всередині бактерій або руйнувати просторову конформацію білкових молекул, пригнічувати реплікацію ДНК та порушувати нормальні фізіологічні функції клітин, що призводить до загибелі мікроорганізмів.

Антибактеріальна активність крохмальних плівок позитивно корелює з концентрацією наночастинок: ефект проти грампозитивного Staphylococcus aureus був сильнішим, ніж проти грамнегативної Escherichia coli. Було досліджено композитні плівки, синтезовані методом відновлення in situ із використанням карбоксиметилцелюлози та крохмалю як відновників і стабілізаторів. Результати показали, що такі плівки проявляють виражену антибактеріальну активність проти S. aureus та E. coli, причому зі збільшенням концентрації розчину $AgNO_3$ інгібуючий ефект плівки значно посилювався.

10.9.3. Активні плівки на основі крохмалю з контрольованим вивільненням

Зазвичай використовувані антиоксидантні та антибактеріальні матеріали ефективно запобігають окисленню та росту мікроорганізмів. Проте важливим аспектом їхньої ефективності є контрольована швидкість вивільнення активних речовин. Якщо вивільнення відбувається занадто повільно, концентрація активних компонентів може бути недостатньою для захисту харчових продуктів, що підвищує ризик їх псування. Натомість при занадто швидкому вивільненні концентрація активних речовин може перевищувати оптимальний рівень, що призводить до деградації компонентів плівки або взаємодії з харчовими складниками. Саме тому сучасні та перспективні дослідження зосереджені на розробці методів регулювання вивільнення активних інгредієнтів із плівок, щоб забезпечити тривалий і безпечний захист харчових продуктів.

Упаковка з контрольованим вивільненням активних речовин подовжує термін придатності харчових продуктів, забезпечуючи поступове надходження антиоксидантів або антибактеріальних агентів протягом зберігання. Існує багато способів розробки таких систем, серед яких найпоширенішими є хімічна модифікація матеріалу, багатошарове формування плівок та використання зшивачів. У сучасних дослідженнях особливу увагу приділяють мікроінкапсулюванню активних сполук та впровадженню металоорганічних каркасів у матрицю активних крохмальних плівок.

За механізмом дії системи контрольованого вивільнення можна поділити на дві основні категорії: системи вивільнення та системи абсорбції. У системах вивільнення антимікробні або антиоксидантні агенти взаємодіють із поверхнею харчового продукту, запобігаючи його псуванню та збереженню якості. Поверхнево-активні речовини поєднуються з крохмальною матрицею, формуючи композитні плівки, у яких вивільнення активних компонентів відбувається через механізми розширення, дезінтеграції, дифузії або розпаду.

Крохмальні плівки належать до типу систем вивільнення, індукованих нижнім шаром. Завдяки помірному коефіцієнту дифузії у крохмальній матриці додані активні речовини спочатку не можуть вільно дифундувати. Проте більшість харчових продуктів містять значну кількість води, і при контакті крохмальної плівки з вологим середовищем крохмаль набухає, що розширює його структуру. У цьому стані коефіцієнт дифузії активного агента збільшується, і речовина поступово виходить із плівки. Іншими словами, чим вища вологість продукту, тим швидше відбувається дифузія активних речовин, що дозволяє ефективно контролювати псування та продовжувати термін зберігання продуктів.

Було підготовлено активні плівки на основі кукурудзяного крохмалю з включенням композитних наночастинок зеїну та рутину. Експериментальні дані показали, що початкова швидкість вивільнення була високою, а кумулятивне вивільнення рутину протягом перших 2 годин становило 19,8–27,1%. Це пояснюється слабким зв’язуванням або адсорбцією рутину на наночастинках

зеїну. На стадії пролонгованої дії рутина вивільняється поступово: через 12 годин її вивільнення становило лише 27,1–36,9% від загальної кількості, що відбувалося через міграцію з наночастинок у розчин. Диспергувані в плівці наночастинки зеїну та рутину дозволяють контролювати та регулювати вивільнення активних речовин у водному середовищі харчової упаковки.

Також були підготовлені крохмальні плівки, що містять частинки крохмалю-кверцетину, схожі на пончики, з використанням горохового та кукурудзяного крохмалю як матриці. In vitro дослідження показали, що кверцетин вивільняється з плівки у водно-етанольному розчині. Вивільнення з плівок на основі зернового крохмалю досягало рівноваги протягом 1–4 днів, тоді як з плівок на основі бобового крохмалю – протягом приблизно 1 тижня, демонструючи вплив типу крохмалю на кінетику вивільнення активних речовин.

10.10. Інтелектуальні плівки на основі крохмалю

Окрім подовження терміну придатності харчових продуктів за допомогою активних речовин, можливе створення нового типу інтелектуальної упаковки, що надає пакувальним матеріалам на основі крохмалю додаткові функції. Інтелектуальна упаковка здатна контролювати якість продуктів всередині упаковки або реагувати на зміни в навколишньому середовищі продукту. Натуральні активні компоненти, що використовуються в таких плівках, зазвичай мають антибактеріальні та антиоксидантні властивості. Таким чином, більшість інтелектуальних упаковок одночасно є активними, проте рідко проводяться дослідження, які оцінюють обидві функції водночас.

Порівняно з іншими біорозкладними полімерними матеріалами, основною перевагою плівок на основі крохмалю є їхня безбарвність і прозорість, що дозволяє спостерігати за продуктом без спотворення його кольору та зовнішнього вигляду упаковки. Завдяки цьому зміни кольору плівки не залежать від матриці харчового продукту, що робить крохмальні плівки особливо придатними для пакування свіжих і оброблених продуктів.

Інтелектуальна упаковка на основі крохмалю зазвичай інтегрує різноманітні індикатори, які надають користувачеві інтуїтивно зрозумілу, кількісну або напівкількісну інформацію про стан продукту через візуальні зміни, такі як колір, прозорість або інтенсивність забарвлення. До таких індикаторів належать:

Індикатори свіжості – реагують на специфічні гази або хімічні продукти розпаду, що утворюються під час зберігання (наприклад, аміак або леткі органічні сполуки), і відображають залишковий термін придатності продукту.

Індикатори залежності часу від температури (TTI, Time-Temperature Indicators) – оцінюють накопичувальний ефект температури на продукт і дозволяють візуально визначити, наскільки продукт зберігався в межах допустимих умов.

pH-індикатори – змінюють колір у відповідь на зміни кислотності, що часто відбуваються під час псування продуктів, таких як м'ясо, риба або молочні вироби.

Поєднання таких індикаторів із активними компонентами, наприклад антиоксидантами чи антимікробними агентами, дозволяє створювати двофункціональні інтелектуальні пакувальні системи, які одночасно запобігають псуванню продукту та інформують про його стан у реальному часі. Це особливо важливо для продуктів зі скороченим терміном придатності, таких як свіже м'ясо, риба, молочні вироби та готові до споживання страви.

Крохмальні матриці завдяки своїй модифікаційній здатності дозволяють інтегрувати різні типи індикаторів і активних агентів, включаючи наночастинки, поліфеноли, ефірні олії та інші натуральні або синтетичні сполуки. Крім того, можливість контролювати вивільнення активних речовин та водопоглинання робить такі плівки універсальними для продуктів із різним рівнем вологості та різними типами упаковки.

Завдяки прозорості, безбарвності, екологічності та багатофункціональності, плівки на основі крохмалю є перспективним матеріалом для створення сучасних активних і інтелектуальних систем

пакування, які поєднують безпеку, функціональність та естетичний вигляд упаковки.

10.10.1. Індикатор свіжості

Плівкоутворювальна здатність крохмалю робить цей біополімер придатною основою для створення інтелектуальних колориметричних плівок. Останнім часом значно зріс інтерес до розроблення pH-чутливих матеріалів на основі крохмалю, здатних сигналізувати про зміни стану харчових продуктів. Зміна рівня pH є одним із ключових індикаторів свіжості, оскільки під час мікробіологічного псування їжі відбувається утворення метаболітів, що змінюють кислотно-лужний баланс навколишнього середовища. Таким чином, за допомогою контролю pH можна оцінювати якість продукту та ступінь його свіжості.

Природні pH-індикатори, як правило, є безпечними для людини та довкілля і можуть бути отримані з різноманітних рослинних джерел. Саме тому їх використання стало одним із найактуальніших напрямів досліджень у сфері інтелектуального пакування харчових продуктів. Найчастіше застосовують такі біоактивні сполуки, як антоціани, куркумін, каротиноїди та інші природні пігменти. Серед них антоціани вирізняються особливо широким спектром кольорових переходів і високою чутливістю до змін кислотності, що забезпечує наочну та контрастну індикацію.

Для визначення змін pH в інтелектуальних пакувальних системах використовують переважно два підходи: колориметричний метод, заснований на візуальній зміні кольору індикатора, та електрохімічний метод, що дає змогу отримувати кількісні значення кислотності. Завдяки поєднанню цих підходів крохмальні плівки можуть виконувати не лише захисну, а й аналітичну функцію, забезпечуючи оперативний контроль якості харчових продуктів під час зберігання.

Крохмаль, використаний як плівкова матриця у поєднанні з індикаторними речовинами, здатний реагувати на зміни, що відбуваються в харчових продуктах

під час їх зберігання. У процесі псування утворюються леткі сполуки — аміак, диметиламін, триметиламін та інші гази, які змінюють кислотно-лужний баланс (pH) навколо продукту. У відповідь на ці зміни природні пігменти, введені до складу пакувальної плівки, змінюють своє забарвлення, що є наслідком їхнього хімічного механізму чутливості до pH.

Наприклад, антоціани, отримані з бок-чою, демонструють виражену залежність кольору від значення pH: від бузкового у кислому середовищі до синьо-фіолетового та синьо-зеленого — у нейтральному та лужному. Така чітка зміна кольору дає змогу споживачеві легко визначити ступінь свіжості продукту — свіжий він, частково зіпсований чи непридатний до споживання.

Було розроблено колориметричну pH-індикаторну плівку на основі агару, картопляного крохмалю та антоціанів, екстрагованих із солодкої картоплі. При використанні цієї плівки для пакування свинини її колір змінювався з червоного на зелений у міру підвищення pH та розвитку процесів псування.

Також досліджено систему моніторингу pH на основі композиції хітозану, кукурудзяного крохмалю та екстракту фіолетової капусти, яку застосовували як візуальний індикатор псування риби.

Отже, поєднання крохмальних плівок із природними pH-чутливими барвниками є перспективним підходом до створення інтелектуальних пакувальних матеріалів, що забезпечують наочний контроль якості та свіжості харчових продуктів у реальному часі.

Електрохімічні методи у pH-сенсорах використовуються для перетворення хімічної інформації в електричні сигнали, що дозволяє проводити точні аналітичні вимірювання. Сенсор отримує хімічні дані, перетворює їх у корисну енергію, а потім у електричний сигнал для подальшої обробки. У системах харчової упаковки побічні продукти псування їжі взаємодіють з електродами сенсора, спричиняючи хімічні зміни, які фіксуються електрохімічним методом.

Порівняно з електрохімічними сенсорами, колориметричні pH-сенсори часто демонструють більш явну кореляцію між зміною pH та візуальною реакцією. У таких сенсорах інтенсивність кольору та його зміни безпосередньо

залежать від концентрації pH-чутливих речовин. Збільшення частки цих речовин та зменшення кількості зв'язуючого субстрату підвищує колориметричну інтенсивність.

Зокрема: вищий вміст антоціанів призводить до яскравішої зміни кольору; пориста структура крохмалю підвищує чутливість сенсора до змін pH; додавання целюлозного сполучного речовини покращує механічну міцність сенсора, забезпечуючи його стабільність і довговічність.

Таким чином, баланс між концентрацією активних речовин, структурою матриці та механічними властивостями визначає ефективність та практичність колориметричних pH-сенсорів у харчовій упаковці.

10.10.2. Датчик часу-температури

Швидкопсувні продукти особливо чутливі до температурних коливань, і їх зберігання за низьких температур ефективно подовжує термін придатності. Високі температури прискорюють деградацію якості продуктів, що призводить до дострокового закінчення їх терміну придатності. Час та температура є ключовими факторами, що визначають збереження якості більшості харчових продуктів.

Індикатори часу-температури (TTI, Time-Temperature Indicators) дозволяють фіксувати температурні зміни, яким піддавався продукт, та відображати залишкову «терміну придатності» під час його зберігання і транспортування. Завдяки цій інформації можна контролювати температурний режим на кожному етапі ланцюга постачання, забезпечуючи безпеку та якість продукту.

Індикатори TTI забезпечують незворотні та видимі зміни кольору, які виникають унаслідок хімічних, мікробних, ферментативних або фізичних змін продукту під час впливу температури. Діапазон від активації до завершення індикатора зазвичай відображається поступовими змінами кольору, що корелюють із залишковим терміном придатності конкретного харчового продукту.

Порівняно з іншими галузями, дослідження індикаторів часу та температури (TTI) розпочалися відносно пізно, і кількість відповідних досліджень досі обмежена. Наприклад, для створення натуральної альтернативи електронним TTI-датчикам дослідники додавали екстракт міоглобіну та нітриту до термопластичної сенсорної плівки на основі крохмалю касави. Це дало біорозкладний, нетоксичний термохромний сенсор на основі білка.

Щоб оцінити його здатність реагувати на температурні зміни, вивчали візуальні та інструментальні зміни кольору міоглобіну та нітритних комплексів у плівці в різних умовах. Результати показали, що така плівка може ефективно використовуватися як TTI-датчик для харчової упаковки або етикеток.

Крім того, їстівні крохмальні плівки, що містили ліофілізовані частинки ожини, піддавалися стерилізації при 127 °C протягом 15 хвилин. Після термічної обробки плівки демонстрували помітну зміну кольору з червоного на коричневий, що підтвердило їхню здатність функціонувати як термохромні індикатори.

Крохмальні плівки досягли значного прогресу у механічних та бар'єрних властивостях, а численні дослідження підтверджують їхню перспективність як альтернативи нафтовим полімерним матеріалам для харчової упаковки. Модифікація крохмалю та введення додаткових компонентів дозволили отримувати плівки з характеристиками, порівнянними з традиційними пакувальними матеріалами.

Більше того, крохмальні плівки ефективно використовуються як носії функціональних інгредієнтів для створення активної та інтелектуальної упаковки. Вони здатні поєднувати антибактеріальні, антиоксидантні та індикаторні агенти, що не лише покращує термін придатності та якість продуктів, але й забезпечує можливість спостереження за станом псування харчових продуктів у режимі реального часу.

10.11. Застосування активних та інтелектуальних плівок на основі крохмалю в харчовій промисловості

У відповідь на зростаючий споживчий попит у харчовій промисловості виникає потреба подовжити термін придатності продуктів. Підтримка високої якості харчових продуктів протягом усього циклу обігу є надзвичайно важливою. У цьому контексті деякі біорозкладні плівки на основі крохмалю використовуються як пакувальні матеріали, оскільки вони поєднують екологічність із здатністю забезпечувати захист продуктів та подовжувати їхню придатність до споживання.

10.11.1. Активна упаковка

Застосування активних плівок на основі крохмалю в харчовій упаковці дозволяє ефективно пригнічувати ріст мікроорганізмів та окислення ліпідів у продуктах, що сприяє подовженню терміну їхнього зберігання. Основу цього ефекту складають антибактеріальні та антиоксидантні властивості плівки. Під час використання активної плівки активні речовини дифундують до поверхні продукту або верхнього шару упаковки, запобігаючи погіршенню його якості. Консерваційний ефект плівки забезпечується взаємодією між активними компонентами та харчовим продуктом.

Дослідження показали, що антибактеріальна плівка на основі крохмалю ямсу з додаванням евгенолу проявляє високу активність проти Escherichia coli, перевищуючи ефективність щодо Listeria monocytogenes та Staphylococcus aureus. Використання такої плівки здатне подовжити термін зберігання свинини більш ніж на 50%. Механізм дії гідрофобних активних речовин полягає в їх прикріпленні до поверхні клітин мікроорганізмів та проникненні через плазму, ферменти й інші внутрішньоклітинні мішені, що призводить до руйнування клітинної стінки та витоку внутрішньоклітинних компонентів. Вбудування гідрофобних сполук у крохмальну матрицю забезпечує їх поступове вивільнення, подовжуючи ефективність бактеріостатичної дії під час транспортування та зберігання продуктів.

Крім того, були розроблені термопластичні плівки на основі крохмалю та монтморилоніту, що містять гідрофобні активні речовини, такі як тимол і карвакрол. Плівки розміщувалися в поліетиленових контейнерах, де активні компоненти вивільнялися у вигляді водяної пари, забезпечуючи консервацію полуниці та підтримку її якості протягом зберігання.

Незважаючи на перспективність активних плівок на основі крохмалю для харчової упаковки, їхнє застосування поки що перебуває на ранній стадії досліджень. Існує низка проблем і невирішених питань, які потребують подальшої розробки та вивчення. До них належать:

Механізм взаємодії між крохмальною плівкою та харчовим продуктом – детальне розуміння антибактеріальної та антиоксидантної дії плівки, включаючи процеси дифузії активних компонентів, взаємодії з мікроорганізмами та реакції з компонентами продукту.

Вплив на органолептичні властивості продукту – необхідно оцінити, чи не змінює плівка смак, запах, колір або текстуру їжі під час зберігання.

Стабільність активних компонентів – включаючи стійкість до температури, вологості та часу зберігання, а також контрольоване та прогнозоване вивільнення антибактеріальних і антиоксидантних агентів.

Сумісність з різними типами харчових продуктів – оскільки різні продукти мають різний рівень вологості, кислотності та складу, важливо адаптувати плівки до специфічних умов зберігання.

Економічна та технологічна доцільність виробництва – включаючи ефективність масштабування, вартість сировини та простоту інтеграції в існуючі ланцюги постачання.

Подальші дослідження в цих напрямках дозволять оптимізувати властивості активних крохмальних плівок та сприятимуть їх широкому впровадженню в харчовій промисловості як безпечної та екологічної альтернативи традиційним упаковкам на основі полімерів із нафти.

Окрім прикладних досліджень активної упаковки, науковці активно працюють над створенням інтелектуальних пакувальних матеріалів на основі

крохмалю. Сучасні дослідження зосереджені переважно на розробці індикаторних інтелектуальних плівок, які поєднують стандартні функції пакування з можливістю надання споживачеві інформації про стан продукту через зовнішні зміни, найчастіше — кольору.

Одним із прикладів є колориметрична плівка, отримана з використанням картопляного крохмалю, хітозану та антоціанів лоніцери (PS-CH-LCA). Плівку виготовляли шляхом контролю значення pH плівкоутворюючого розчину, надаючи їй одночасну чутливість до pH та аміаку (NH_3). Таку плівку застосували для моніторингу свіжості креветок у реальному часі.

Результати експериментів показали, що плівка PS-CH-LCA (pH = 2,5) демонструвала високу чутливість до зміни кольору і тісно корелювала з традиційними показниками псування продукту, такими як накопичення аміаку та зміни мікробіологічного складу. Це свідчить про те, що плівка може ефективно відображати стан свіжості креветок, розрізняючи свіжий продукт, продукт середньої свіжості та зіпсований.

Таким чином, подібні інтелектуальні крохмальні плівки дозволяють споживачам отримувати наочну, надійну та оперативну інформацію про якість продукту, підвищуючи безпеку харчових продуктів і зменшуючи ризик їхнього споживання після початку псування.

Згідно з наявними дослідженнями, інтелектуальні пакувальні матеріали на основі крохмалю переважно створюються з використанням колориметричного принципу, який дозволяє візуально відстежувати зміни в харчових продуктах. Такий підхід особливо ефективний для продуктів, у яких під час псування відбуваються значні зміни значення pH, адже колір плівки змінюється відповідно до цих хімічних змін.

Проте точний зв’язок між зміною pH та фактичним погіршенням якості продукту поки що недостатньо вивчений і потребує подальших експериментальних досліджень. Це обмежує точність оцінки свіжості та стану харчового продукту лише за колірними змінами.

Крім того, деякі дослідження показали можливість поєднання інтелектуальної функції з активною антибактеріальною дією у складі однієї плівки. Це відкриває перспективу розробки інтелектуальних активних пакувальних матеріалів, які одночасно можуть повідомляти про стан продукту та запобігати його псуванню, що стає важливим напрямком майбутніх досліджень у галузі харчової упаковки.

10.12. Перспективи на майбутнє

Біорозкладні пакувальні матеріали на основі крохмалю можуть відігравати ключову роль у майбутньому розвитку екологічно чистих упаковок для харчових продуктів, значно зменшуючи енергетичне та екологічне навантаження, пов'язане з використанням традиційних полімерів на основі нафти. Основним обмеженням таких матеріалів наразі є їхні порівняно слабкі механічні та бар'єрні властивості, що є наслідком природних характеристик крохмалю.

Для подолання цих обмежень дослідники застосовують фізичну або хімічну модифікацію крохмалю, його змішування з іншими біополімерами, а також введення функціональних добавок. Після поліпшення базових механічних і бар'єрних властивостей можна створювати активну упаковку на основі крохмалю, інтегруючи в неї антибактеріальні та антиоксидантні компоненти. Такий підхід дозволяє ефективно подовжувати термін зберігання харчових продуктів і зменшувати харчові відходи.

Окрім активної функції, крохмальні плівки можуть виконувати роль індикаторів часу та температури, а також pH- та газочутливих сенсорів, що дозволяє в режимі реального часу оцінювати свіжість продуктів за зміною кольору чи інших фізичних параметрів. Завдяки цим властивостям крохмальні плівки вже знаходять широке застосування у пакуванні свіжих продуктів, забезпечуючи їх захист від мікробного псування та окислення.

У перспективі очікується подальший розвиток активної та інтелектуальної упаковки на основі крохмалю, яка поєднуватиме екологічність, функціональність і здатність інформувати споживача про стан продукту в

реальному часі, що робить її привабливою альтернативою традиційним пластиковим матеріалам.

Хоча деякі методи модифікації та змішування крохмалю значно покращили механічні та бар'єрні властивості плівок, створення біорозкладних крохмальних плівок з характеристиками, порівнянними з традиційною пластиковою упаковкою, все ще потребує додаткових досліджень. Властивості таких плівок значною мірою залежать від типу крохмалю, технології приготування, умов зберігання та інших факторів, що призводить до недостатньої однорідності та стабільності кінцевого продукту.

Наразі більшість досліджень застосування крохмальних пакувальних матеріалів проводиться на лабораторному рівні. Перехід до промислового виробництва обмежується питаннями безпеки, регуляторними вимогами, екологічними аспектами та сприйняттям споживачів. Поєднання крохмалю з іншими полімерними або функціональними матеріалами потребує подальшого вивчення для задоволення практичних потреб харчової упаковки.

Додатковий потенціал полягає у використанні активних добавок для розробки антибактеріальних та антиоксидантних плівок. Проте наразі бракує чітких критеріїв для оцінки та кількісного визначення антимікробної та антиоксидантної активності. Наприклад, більшість випробувань проводиться у воді або базових моделях, тоді як «харчові імітатори», що відтворюють різні типи продуктів, ще недостатньо досліджені.

Сфера смарт-плівок на основі крохмалю має значний потенціал, але її функціональність поки що обмежена. Переважна більшість інтелектуальної упаковки використовує pH-індикатори, які реагують на зміну середовища в упаковці. Водночас активні компоненти можуть впливати на pH системи, що іноді призводить до несвоєчасності або неправильної інтерпретації сигналів індикатора, і споживачі можуть хибно оцінювати якість продукту.

Для подальшого розвитку інтелектуальної упаковки необхідні дослідження щодо поєднання функціональних харчових компонентів з мультиреактивними крохмальними матрицями. Зокрема, змішування з

термочутливими, вологочутливими, газочутливими та іншими багатофункціональними матеріалами може створити нові плівки, здатні виконувати комплексні функції, реагувати на стимул відповідно до потреб конкретного продукту та забезпечувати контрольоване, пролонговане вивільнення активних речовин.

Таким чином, майбутнє крохмальних плівок лежить у створенні багатофункціональних, активних та інтелектуальних пакувальних систем, які одночасно будуть екологічними, безпечними та ефективними у продовженні терміну придатності та контролі якості харчових продуктів.

Підсумовуючи, незважаючи на існуючі недоліки активної та інтелектуальної упаковки на основі крохмалю щодо вибору матеріалів, технологій підготовки та функціональної ефективності, крохмаль вже продемонстрував себе як перспективний субстрат для заміни традиційної нафтової упаковки. Його унікальні структурні властивості, біорозкладність, прозорість та здатність до інтеграції активних і індикаторних компонентів роблять його ідеальною основою для розробки сучасних пакувальних систем. Завдяки цьому крохмаль має значний потенціал стати провідним матеріалом у розвитку інтелектуальної та активної упаковки харчових продуктів у майбутньому, поєднуючи екологічність, безпеку та функціональність.

Питання для самоконтролю

1. Якими властивостями крохмаль обумовлено його вибір як компонента пакувальних матеріалів?
2. Як називається лінійна структура крохмалю?
3. Як називається розгалужена структура крохмалю?
4. Чи є природні крохмалі напівкристалічними?
5. Що таке термопластичний крохмаль?
6. Як багатофазні переходи крохмалю під час екструзії впливають на властивості кінцевого екструдованого продукту?

7. Які переваги мають композити з армуванням за участю крохмалю?

8. З якою метою використовуються крохмальні нанокристали при виробництві пакувальних матеріалів?

9. Що таке самоармовані композити?

10. Як суміш крохмалю та гранатової шкірки впливає на властивості композиту?

11. На які властивості полімерних матеріалів впливає піноутворення у крохмальних матеріалах?

12. У чому проявляється інтелектуальність пакувальної плівки на основі крохмалю?

13. Молекули яких речовин використовуються для створення повністю біорозкладних плівок?

14. Яку роль відіграє крохмаль у виробництві біорозкладних пластиків?

15. Як хімічна та фізична модифікація крохмалю сприяє створенню біорозкладних пластиків?

16. Якими бар'єрними властивостями характеризуються біорозкладні матеріали на основі крохмалю?

17. Яким чином можна надати плівці пакувального матеріалу на основі крохмалю антибактеріальних властивостей?

18. Яку роль мають відігравати біорозкладні матеріали на основі крохмалю у майбутньому розвитку екологічно чистих пакувальних матеріалів?

Рекомендована навчальна література

1. Грабовська О. В. Технології крохмалю і крохмалепродуктів : підручник / О. В. Грабовська ; Нац. ун-т харч. технол. Київ : НУХТ, 2019. 315 с.

2. Біополімерні матеріали для пакування харчових продуктів : навч. посіб. / В. М. Пасічний, О. В. Фурсік, І. В. Страшинський та ін. Київ : НУХТ, 2021. 215 с.

3. Харчові технології : підручник : у 2 т. Т. 2 / В. А. Домарецький, М. М. Калакура, Л. М. Тележенко та ін. ; за ред. А. І. Українця. Київ : НУХТ, 2017. 611 с.

4. Малишев В. В. Нанотехнології та наноматеріали у харчовій промисловості : навч. посіб. / В. В. Малишев, А. І. Українець, С. В. Габрик. Київ : НУХТ, 2018. 320 с.

5. Біодеградабельні пакувальні матеріали на основі рослинних полімерів : монографія / О. О. Шульга, Ю. Г. Савченко, В. В. Чорна. Харків : Світ книг, 2020. 190 с.
6. Смарт-упаковка для харчових продуктів : стан та перспективи : навч. посіб. / О. П. Чигвінцева, Т. В. Капліна, Л. М. Глушкова. Дніпро : ПДАУ, 2022. 154 с.
7. Бухкало С. І. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах (приклади та тести з технології крохмалю) : підручник. 2-ге вид., допов. Ч. 2. Київ : Центр навчальної літератури, 2019. 108 с.
8. Кучерук З. І. Використання полісахаридів рослинного і мікробного походження в технології безбілкового хліба : монографія / З. І. Кучерук, О. С. Цуканова. Харків : ХДУХТ, 2014. 131 с.
9. Харчова біотехнологія : підручник / Т. П. Пирог, М. М. Антонюк, О. І. Скроцька, Н. Ф. Кігель. Київ : Ліра-К, 2016. 408 с.
10. Тіхосова Г. А. Митний контроль та експертиза товарів : навч. посіб. / Г. А. Тіхосова, О. М. Вербицький, Є. О. Калінський. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2019. 312 с.
11. Технологічна експертиза харчової продукції : навч.-метод. посіб. / уклад.: В. М. Федорів, І. М. Кобаса, В. В. Дійчук. Чернівці : Чернівец. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2020. 182 с.
12. Starch: chemistry and technology / ed.: R. L. Whistler, J. N. BeMiller, E. F. Paschall. 3rd ed. San Diego : Academic Press, 2012. 894 p.
13. Starch-Based Materials for Food Packaging : Processing, Characterization and Applications / ed. by M. J. Fabra, A. Lopez-Rubio, J. M. Lagaron. New York : Elsevier, 2017. 360 p.
14. Bio-Based Polymers for Packaging / ed. by S. Thomas, J. George, A. S. Sethu. London : RSC Publishing, 2021. 420 p.
15. Active and Intelligent Food Packaging : Materials and Technologies / ed. by J. Singh, J. J. Singh. Wiley-VCH, 2023. 512 p.

Розділ 11. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕКТИНУ

11.1. Коротко про пектин, його класифікація і властивості

Пектин — це гідроколоїд рослинного походження, який широко використовують як інгредієнт у багатьох харчових продуктах, у фармацевтичній промисловості, а також в інших галузях, зокрема під час створення їстівних плівок, пластифікаторів, замінників паперу та піноматеріалів. Таке різноманіття застосувань зумовлене його унікальними структурними та біохімічними властивостями.

Термін «пектин» використовують для позначення групи полімерів, що відрізняються вмістом нейтральних цукрів, молекулярною масою та хімічною будовою, оскільки пектини з різними функціональними характеристиками синтезуються різними видами рослин. Наявність різноманітних функціональних груп і структурних модифікацій забезпечує широкі можливості використання пектинових молекул, передусім завдяки їх доступності, нетоксичності та відносно низькій вартості виробництва.

Пектин у промислових масштабах отримують переважно з фруктових відходів, що утворюються у значних обсягах у плодопереробній галузі. За відсутності утилізації такі відходи потрапляють на звалища, де зазнають мікробіологічного розкладання, що супроводжується утворенням парникових газів і негативно впливає на довкілля.

Цю речовину вперше було виділено з плодів тамаринду у 1790 році, а сам термін «пектин» запроваджено у 1825 році від грецького слова pektikos, що означає «здатний до згущення або застигання».

Пектин є родиною складних полісахаридів, які становлять значну частку маси клітинних стінок рослин: приблизно до 35 % у клітинах дводольних рослин, 2–10 % — у травах і близько 5 % — у деревних тканинах. Біосинтез пектину відбувається в апараті Гольджі з UDP-D-галактуронової кислоти на ранніх стадіях росту рослин, у процесі формування та розширення клітинних стінок.

Апарат Гольджі (або комплекс Гольджі) — це одномембранна органела, притаманна еукаріотичним клітинам. Вона відіграє важливу роль у модифікації, сортуванні та транспортуванні білків і ліпідів, а також бере участь в утворенні лізосом та деяких інших клітинних структур.

Стадія розвитку рослини значною мірою визначає склад і структурну організацію пектину. Він виконує роль основного цементувального агента клітинної стінки, ковалентно з'єднуючи целюлозні фібрили з іншими полімерними компонентами. Водночас пектинові речовини міжклітинного простору формують середовище, через яке здійснюється транспорт води та поживних речовин. У взаємодії з іншими складовими клітинної стінки пектин сприяє підтриманню тургору, що, своєю чергою, зумовлює ріст і розтягнення рослинних клітин.

Тургор (англ. turgor) — це стан напруження клітинної стінки, що виникає внаслідок внутрішнього тиску цитоплазми на клітинну оболонку. У рослин він забезпечує пружність, механічну стійкість і підтримання форми тканин та органів.

Карбоксильні групи пектину під час синтезу є сильно метилестерифікованими, проте з настанням зрілості ці естери піддаються деполімеризації ферментом пектинметилестеразою. Американське хімічне товариство класифікує пектинові речовини на чотири основні типи: протопектин, пектинову кислоту, пектин та пектати.

Протопектин є вихідною формою пектину, яка відносно нерозчинна у воді та не має здатності до гелеутворення. Він переважно локалізується у внутрішніх шарах клітинних стінок рослин і перетворюється на водорозчинний пектин шляхом обмеженої деполімеризації. Фермент, що гідролізує протопектин, називають протопектиназою; його дія призводить до розчинення протопектину та розділення сусідніх клітин рослин.

Пектинова кислота утворюється з пектину внаслідок дії ферментів, що гідролізують метильні групи. Вона водорозчинна, проте не здатна утворювати гель. Пектинові кислоти складаються з довгих полігалактуронанів із менше ніж 75 % метильованих галактуронатних залишків, а їхні солі відомі як пектати.

Пектин (або водорозчинна форма пектинової кислоти) є розчинним полімером, необхідним для утворення гелів. У полісахариді пектину, відомому як поліметилгалактуронат, близько 75 % карбоксильних груп естерифіковані метанолом, що визначає його здатність до гелеутворення.

Олігосахариди пектину відіграють важливу роль у стимуляції росту та активності корисних кишкових бактерій, завдяки чому пектин розглядають як потенційний пребіотик. Він характеризується хорошими фізіологічними властивостями, включно з текстурними, гелеутворюючими та реологічними характеристиками.

Таблиця 22 – Пектин, його класифікацію та властивості

Категорія	Опис	Основні властивості	Функціональні та біологічні застосування
Протопектин	Первинна форма пектину, нерозчинна у воді, присутня у внутрішніх шарах клітинної стінки	Не утворює гель, водонерозчинний	Перетворюється на водорозчинний пектин ферментативною деполімеризацією; впливає на структуру клітинної стінки
Пектинова кислота	Утворюється з пектину шляхом ферментативного видалення метильних груп	Водорозчинна, не формує гель, менше 75 % метильованих груп	Антиоксидантна та протизапальна активність; антибактеріальні властивості; утворення пектатів; здатність поглинати жири та іони
Пектин (водорозчинний)	Метильовані полігалактуронани (~75 % метильованих карбоксильних груп)	Гелеутворюючий, текстурні та реологічні властивості	Використання у харчовій промисловості та фармацевтиці; виробництво їстівних плівок; потенційний пребіотик; підтримка здоров'я кишечника; сприяє загоєнню ран та лікуванню
Пектати (солі пектинової кислоти)	Солі пектинових кислот	Водорозчинні, здатні зв'язувати іони та жири	Антиглікаційна активність; зв'язування металів та жирів; функціональні харчові добавки; використання у фармацевтичних препаратах

Пектин та сполуки, отримані з нього, демонструють різноманітні функціональні властивості. Зокрема, їм притаманні антиоксидантна та протизапальна активність, антибактеріальні та антиглікаційні властивості, здатність поглинати жири та зв'язувати іони. Крім того, пектин використовують у виробництві їстівних харчових покриттів, досліджують його потенціал у загоєнні ран та як компонент перев'язувальних матеріалів, що активно вивчається фармацевтичною промисловістю.

Існує численна література, присвячена пектину, що охоплює такі теми, як методи екстракції, хімічна структура, фармацевтичне застосування, нутрицевтичні та функціональні властивості, а також використання пектину в харчовій упаковці. Водночас комплексних оглядів, які б одночасно охоплювали джерела пектину, методи його екстракції та потенційне застосування, досі обмаль.

У цьому розділі розглядаються структура та функціональні властивості пектину, сучасні методи його екстракції, міждисциплінарна роль у різних галузях — зокрема в харчовій промисловості, пакуванні, зв'язуванні антиоксидантів та металів — а також його властивості, що сприяють поліпшенню здоров'я, з огляду на останні дослідження.

11.2. Основна структура пектину

Пектин — це полісахаридний вуглевод, що має складну структурну організацію і складається з повторюваних сахаридних субодиниць. Основні ланцюги пектину представлені трьома типами структур і складаються переважно з метильованих одиниць D-галактуронової кислоти. На структуру пектину значний вплив чинять умови його виділення, зберігання та обробки рослинної сировини.

D-Галактоза при окисленні перетворюється на D-галактуронову кислоту: шостий вуглець у бічній R-групі зовні сахаридного кільця окиснюється до карбоксильної групи. Кислотна природа D-галактуронової кислоти забезпечує

негативний заряд, необхідний для формування міцних міжмолекулярних зв'язків, що визначає структуру та жорсткість клітинних стінок рослин.

У пектині утворюється α(1→4)-зв'язок між екваторіальною гідроксильною групою на першому вуглеці однієї молекули галактуронової кислоти та екваторіальною гідроксильною групою на четвертому вуглеці наступної молекули, що призводить до формування лінійного полісахаридного ланцюга.

Пектин складається з довгих ланцюгів α-D-галактуронатних одиниць, з'єднаних α(1→4)-зв'язками, а також містить 2–3 % L-рамнози, пов'язаної з галактуроновими одиницями через β(1→2) та β(1→4)-зв'язки, що утворює первинну структуру пектинових полісахаридів.

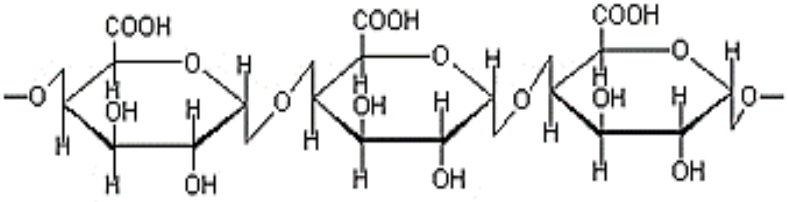


Рис. 41. Будова пектину

Пектиновий порошок, який застосовується в різних галузях промисловості, має колір від білого до світло-коричневого. Його відтінок залежить від джерела сировини та наявності додаткових сполук, таких як ефірні олії та вітаміни. Цедра різних цитрусових містить пектин різного кольору: цедра апельсина дає коричневий пектин, цедра лайма та білого грейпфрута — золотисто-жовтий, цедра лимона — жовтий, а цедра червоного грейпфрута — також золотисто-жовтий. Ці природні сполуки сприяють зміцненню імунітету та дозволяють ефективно перетворювати відходи харчового виробництва на цінні ресурси.

11.3. Ланцюги пектину

Ланцюги пектину зазвичай класифікують за ступенем та типом заміщення на три основні типи: гомогалактуронан, рамногалактуронан I та рамногалактуронан II.

Гомогалактуронан представляє собою простий ланцюг полігалактуронової кислоти без заміщень, його часто називають «гладкими» ланцюгами; вони становлять приблизно 60% усіх пектинів клітинних стінок.

Рамногалактуронан I характеризується довгою послідовністю чергуючих одиниць галактуронової кислоти та D-рамнози, формуючи просторово впорядковані полімери.

Ксилогалактуронан складається з основного ланцюга галактуронової кислоти, розгалуженого ксилозними одиницями, тоді як ***рамногалактуронан II*** має гомогалактуронановий основний ланцюг, заміщений численними складними бічними ланцюгами гліканів, що містять різноманітні нейтральні цукри.

Щодо глікозидних зв'язків: у гомогалактуронану пектину присутні 1,4-глікозидні зв'язки вздовж усього ланцюга. Рамногалактуронан I з'єднується через 1,2-глікозидні зв'язки (C1 галактуронової кислоти – C2 рамнози), а рамногалактуронан II формує 1,4-глікозидні зв'язки (C1 рамнози – C4 галактуронової кислоти).

За винятком рамногалактуронану II, інші галактуронани не мають стабільної строго визначеної структури. Спіральна форма ланцюгів виникає через характер їхніх зв'язків. Раніше вважалося, що основний остов молекул пектину складається з ланцюгів гомогалактуронану, а ланцюги рамногалактуронану I та II вставлені як бічні гілки. Нині припускають, що рамногалактуронан I може утворювати основний остов, а гомогалактуронан і рамногалактуронан II виконують роль бічних ланцюгів.

Окрім бічних ланцюгів рамногалактуронану I та рамногалактуронану II, молекули пектину можуть мати певний ступінь ацетилювання та метилестерифікації на галактуронових кислотних одиницях. Під час метилестерифікації водень OH-групи карбонової кислоти заміщується метильною групою (CH_3), що змінює групу R з –COOH на $–COOCH_3$.

Деполімеризація молекул пектину різними методами призводить до утворення пектинових похідних, які складаються зі суміші заміщених та незаміщених полімерних фрагментів із різним ступенем полімеризації.

Найчастіше використовують ферментативні та хімічні методи модифікації пектину.

Під час ферментативної обробки небажаних структурних змін можна здебільшого уникнути, оскільки ферменти діють специфічно на свої субстрати завдяки точному механізму дії, що дозволяє отримувати цільові пектинові сполуки. Водночас структурна модифікація пектину відбувається у випадках недостатньої активності ферментів, які не можуть повністю модифікувати молекулу до потрібного ступеня.

11.4. Види пектину

Пектин класифікують як високометоксильований або високоестерний, якщо ступінь естерифікації перевищує 50%; якщо ж цей показник менший за 50%, його відносять до низькометоксильованого або низькоестерного пектину. Ступінь естерифікації визначається як відсоток карбоксильних груп D-галактуронової кислоти, які пройшли реакцію естерифікації з етиловим спиртом.

Структурне розташування пектину обумовлене естерифікацією залишків галактуронової кислоти метильними групами на С-6 та ацетильними групами на О-2 і О-3 у безперервному полігалактуроновому ланцюзі гомогалактуронану. Деестерифікація високометоксильованого пектину в кислому середовищі або його ферментативна обробка пектинметилестеразою призводить до утворення низькометоксильованого пектину.

Амідований пектин не синтезується природним шляхом у рослинах, на відміну від високометоксильованого та низькометоксильованого пектину, проте його можна отримати промислово шляхом перетворення частини неестерифікованих карбоксильних груп на амідні.

Амідований пектин синтезується шляхом реакції аміаку з карбоксиметильними групами (–$COOCH_3$) на молекулі пектину. Ступінь амідування визначається як відсоток карбонових кислотних груп пектину, що перебувають у амідній формі. Заміна метоксильних груп амідними змінює деякі

фізико-хімічні властивості пектинових гелів: амідування підвищує розчинність пектину у воді, робить його більш термооборотним та стійким до коливань концентрації кальцію. Заміну метоксильних груп первинними аліфатичними амінами використовують для отримання N-алкіл-амідованих пектинових кон'югатів із різними функціональними властивостями.

Гелі пектину з високим вмістом метоксилу формуються в присутності розчинних твердофазних речовин при підвищеній концентрації пектину, у водному середовищі та при pH < 3,5. Стабільність цих гелів забезпечується міжмолекулярними водневими зв'язками та гідрофобними взаємодіями між метиловими ефірами. Вони широко застосовуються у виробництві джемів, желе, мармеладу, кондитерських виробів та десертів.

Пектин з низьким вмістом метоксилу утворює гелі в присутності двовалентних іонів кальцію або багатовалентних катіонів у відповідних концентраціях; наприклад, Ca^{2+} іони при pH 2,0–6,0 формують гелі завдяки іонним взаємодіям між вільними карбоксильними групами галактуронової кислоти та катіонами. Такий пектин зазвичай використовується для підвищення стабільності та покращення текстури водорозчинних соєвих екстрактів, дієтичних та молочних продуктів.

Ступінь естерифікації пектину визначає властивості його гелеутворення та емульгування. Він може бути оцінений за допомогою хроматографії, мас-спектрометрії, інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є (FTIR), FT-RAMAN та інших спектроскопічних методів. У сучасних дослідженнях також застосовують технологію пектинових мікрочипів, аналогічну методам вивчення білків та нуклеотидів.

Пектинові мікрочипи складаються з набору молекул-мішеней (пектинів), зондів для їх виявлення (зазвичай моноклональних антитіл) та поверхні для іммобілізації цих сполук (скельця або мембрани). Пектини іммобілізують на поверхні, після чого взаємодіють із зонами в розчині. Виявлення зв'язування здійснюється за допомогою флуоресцентних або колориметричних міток, часто пов'язаних із вторинним антитілом. Гліканові чипи, створені з чистих і добре

охарактеризованих пектинових зразків, дозволяють аналізувати взаємодії між пектинами та лігандами або ферментами, визначати структурні особливості, такі як ступінь естерифікації та склад бічних ланцюгів.

Ще одним перспективним методом дослідження структури пектину є атомно-силова мікроскопія (АСМ). Вона дозволяє оцінювати ступінь розгалуження та загальну будову пектинових молекул шляхом аналізу ізольованих полімерів. Так, дослідження пектину, виділеного з незрілих помідорів, показало, що цей складний біополімер складається з високомолекулярних фрагментів, утримуваних областями рамногалактуронану I. Аналіз пектину тканин цукрового буряка за допомогою АСМ виявив, що він переважно складається з неагрегованих ланцюгів. Полісахарид-білкові комплекси в 67% випадків утворювалися однією молекулою білка, прикріпленою до одного кінця полісахаридного ланцюга, а 33% складали подовжені жорсткі полісахаридні ланцюги.

Дослідження також показали, що деметилестерифікація пектину впливає на механічні властивості клітинних стінок меристематичних тканин: субепідермальні шари активуються, підвищуючи еластичність цих структур. У немеристематичних тканинах стебла такого ефекту не спостерігалося. Різниця результатів пояснюється специфічною дією пектину в різних типах клітинних стінок.

Сировина та вибір осаджувача суттєво впливають на ступінь естерифікації пектину. Застосування пектину в харчовій промисловості значною мірою визначається його ступенем естерифікації, який має перевищувати 60%, оскільки це впливає на швидкість гелеутворення та якість готового гелю. Продукти середньої вологості зазвичай готують за стандартною процедурою: гарячі інгредієнти змішують і потім остуджують для затвердіння. Для пектину з високим ступенем естерифікації потрібна висока температура гелеутворення, щоб забезпечити формування стабільного гелю.

Тривала екстракція може призвести до гідролізу метилових ефірних груп пектину в карбоксильні групи, що зменшує ступінь естерифікації. Крім того,

перетворення пектину на протопектин під час дозрівання плодів супроводжується збільшенням вмісту цукру, що робить фрукти більш м'якими. При цьому хімічні реакції за надмірно низького pH і високих температур також сприяють зниженню ступеня естерифікації пектину.

11.5. Джерела пектину

Високий вміст пектину у фруктах і овочах сам по собі не є єдиним критерієм для їх використання як комерційного джерела екстракції. У клітинній стінці рослин концентрація пектину поступово зменшується від первинної стінки до плазматичної мембрани, причому найвища концентрація спостерігається в середній ламелі. Основними прибутковими джерелами пектину є цитрусові, яблука та побічні продукти їх переробки, зокрема шкірка цитрусових і яблучний жом. Альтернативні джерела включають лушпиння какао, головки соняшнику, цукровий буряк, гарбуз, кавун, груші та картопляний жом.

Таблиця 23 – Джерела пектину

Джерело пектину	**Вміст пектину (% сухої речовини)**	**Тип пектину**	**Гелеутворюючі властивості**	**Особливості / застосування**
Шкірка цитрусових (апельсин, лимон, грейпфрут)	20–30%	Високометоксильований	Високі	Традиційне джерело для джемів, желе, мармеладу та десертів
Яблучний жом	10–15%	Високометоксильований / середньоестерний	Високі	Використовується для джемів, желе, текстуризаторів, стабілізаторів
Головки соняшнику	10–20%	Низькометоксильований	Середні–високі	Добре гелеутворення; застосування у харчових продуктах і для емульсій
Цукровий буряк (жом)	10–20%	Низькометоксильований	Низькі	Відмінні емульгуючі властивості, обмежене гелеутворення; використання у

Джерело пектину	Вміст пектину (% сухої речовини)	Тип пектину	Гелеутворюючі властивості	Особливості / застосування
				напоях, соєвих екстрактах
Картопляний жом	~10%	Низько- / високометоксильований	Середні	Використовується як текстуризатор та для модифікацій пектину
Гарбузовий жом	5–12%	Високометоксильований	Середні	Використання у харчових продуктах як допоміжний пектин
Насіння льону	4–8%	Високометоксильований	Середні	Добре розчиняється у воді, застосовується як емульгатор або стабілізатор
Абрикоси	~1%	Високометоксильований	Низькі	Нетрадиційне джерело, використовується у сумішах фруктових пюре
Вишні	~0,4%	Високометоксильований	Низькі	Нетрадиційне джерело, додатковий компонент у пюре та соках
Морква	1,4%	Високометоксильований	Низькі	Допоміжне джерело для пектинових сумішей
Персики (побічні продукти виробництва соків)	~1–2%	Високометоксильований	Низькі	Використовується для додаткової екстракції пектину
Амарант (побічний продукт)	–	Низько / високометоксильований	Середні	Перспективне нетрадиційне джерело
Оливкові жоми	–	Низько / високометоксильований	Середні	Перспективне нетрадиційне джерело
Відходи манго	–	Низько / високометоксильований	Середні	Перспективне нетрадиційне джерело

Яблучний жом містить близько 10–15% пектину на суху речовину, шкірка цитрусових — 20–30%, а головки соняшнику та цукровий буряк — 10–20%. Для нетрадиційних джерел, таких як абрикоси, вишні, апельсини та морква, вміст пектину становить відповідно 1%, 0,4%, 0,5–3,5% і 1,4% на основі сирої маси. Побічні продукти промисловості, включаючи жом цукрового буряка, амарант, оливкові жоми та відходи манго, є перспективними джерелами пектину. Наприклад, вихід пектину з цукрового буряка може досягати 23% залежно від умов екстракції.

Пектин цукрового буряка містить високий вміст ацетильних груп і нейтральних цукрів, має нижчу молекулярну масу та білки, ковалентно зв'язані в бічних ланцюгах, що обмежує його гелеутворюючу здатність порівняно з яблучним або цитрусовим пектином. Тому, незважаючи на легку доступність і низьку вартість, пектин цукрового буряка рідко використовується як текстуризатор, проте він має відмінні емульгуючі властивості, що підвищує його цінність у певних продуктах.

Залишки головок соняшнику після екстракції олії містять високий вміст галактуронової кислоти і мають високу молекулярну масу з гарними гелеутворюючими властивостями. Пектини соняшнику включають приблизно 11,8–14,3% нерозчинного низькометоксильованого пектину та 3,3–5,0% водорозчинного високометоксильованого пектину. Також повідомлялося про успішну екстракцію пектину з картопляного жому (побічного продукту виробництва крохмалю), гарбузового жому, персикового жому та насіння льону, що продемонструвало значний вихід і задовільні властивості.

Окрім виходу пектину, комерційне застосування визначається його новими властивостями, виявленими під час досліджень. Швидке зростання попиту на пектин завдяки його нетоксичності та широкому застосуванню в харчовій, фармацевтичній та інших галузях підкреслює необхідність пошуку нових джерел. Водночас повна характеристика пектинів є важливою для точного розуміння їх потенційного застосування, про яке наразі можна робити лише попередні висновки.

11.6. Екстракція пектину

Методи екстракції пектину можна поділити на дві основні категорії: традиційні та новітні «зелені» нетрадиційні підходи. Традиційні методи ґрунтуються на нагріванні сировини з кислотами, які діють як каталізатори для розчинення протопектину, і є найбільш поширеними у промисловості.

Процедура традиційної екстракції зазвичай включає три етапи**.** ***Перший етап*** — попередня обробка сировини, яка може включати сушіння, бланшування або промивання. Цей крок запобігає розкладанню пектину, інактивуючи ферменти та мікроорганізми, і створює стабільну основу для екстракції.

Другий етап — власне екстракція пектину, яка зазвичай проводиться з використанням сильної мінеральної кислоти при температурі 75–100 °C протягом 1–3 годин для розчинення протопектину.

Третій етап, або пост-екстракція, включає фільтрування, концентрування та осадження пектину шляхом додавання етанолу у кількості, достатній для повного осадження.

Щоб подолати недоліки, пов’язані з використанням мінеральних кислот, останнім часом активно досліджують органічні кислоти як екологічно безпечну альтернативу, оскільки вони харчові та походять із відновлюваних джерел. Загалом, для підвищення ефективності та зменшення впливу на навколишнє середовище виникла потреба у розробці нових «зелених» технологій екстракції пектину.

Екстракція пектину з природних джерел є трудомістким і чутливим до руйнування процесом, оскільки сировина, наприклад фруктова шкірка або вичавки, містить високу кількість вологи та схильна до розпаду під дією грибкових ферментів. Пектинові ферменти, що продукуються грибами, включають деестерифікуючі (пектинметилестераза) та деполімеризувальні (пектинліаза, полігалактуроназа, пектатліаза) ферменти, які сприяють розщепленню пектину.

Екстракція пектину з яблучних вичавок складніша, ніж із цитрусових шкірок, оскільки вони більш схильні до дії пектолітичних ферментів. Щоб запобігти цьому, сировину слід негайно висушувати для зменшення вмісту вологи перед зберіганням до початку процесу екстракції. У деяких сортів яблук ферментативна обробка м'якоті для отримання соку робить яблучні вичавки непридатними для подальшої екстракції пектину.

Вихід пектину значною мірою залежить від параметрів екстракції, таких як розмір частинок сировини, pH, температура, тривалість екстракції та тип розчинника, а також від методу сушіння. Зокрема, дрібні частинки сировини містять більше протопектину, ніж великі, що підвищує ефективність екстракції.

Таблиця 24 – Традиційні та новітні «зелені» методи екстракції пектину

Категорія методу	**Приклади**	**Умови проведення**	**Переваги**	**Недоліки / обмеження**
Традиційні методи	Нагрівання з мінеральними кислотами (HCl, H_2SO_4)	Температура 75–100 °C, час 1–3 години; пост-екстракція з осадженням етанолом	Високий вихід пектину, добре відпрацьована промислова технологія	Використання агресивних кислот, енергомісткість, екологічні ризики, можливе руйнування пектину, низька селективність
Традиційні методи з органічними кислотами	Лимонна, яблучна, бурштинова кислоти	Схожі температурні умови, кислотність нижча, харчові кислоти	Екологічно безпечні, харчові, відновлювані джерела, менше руйнування пектину	Може потребувати довшого часу екстракції, трохи нижчий вихід
Новітні «зелені» методи	Ультразвукова екстракція, мікрохвильова екстракція, ферментативна екстракція, екстракція з використанням надкритичного CO_2	Нижчі температури, коротший час, менш агресивні умови	Енергоефективність, менше руйнування пектину, високий ступінь селективності, екологічна безпечність	Необхідність спеціального обладнання, більші капітальні витрати, оптимізація параметрів може бути складною

Найчастіше пектин екстрагують водними методами. Серед поширених технологій — пряме кип'ятіння, нагрівання в мікрохвильовій печі, ультразвукова екстракція, автоклавування та електромагнітна індукція.

11.7. Інноваційні методи екстракції пектину

Було вивчено кілька методів, спрямованих на скорочення часу екстракції пектину з побічних продуктів цитрусових. Проте необхідні подальші дослідження для розробки нових процедур, які б підвищили якість пектину та скоротили тривалість екстракції. Традиційний метод екстракції має певні обмеження, такі як тривалий час обробки, нижчий вихід та ймовірність деградації пектину.

Для подолання цих проблем було досліджено сучасні підходи, які дозволяють збільшити вихід, зменшити витрату розчинника та зберегти функціональні властивості пектину. До таких методів належать мікрохвильова екстракція (MAE), ферментативна екстракція (EAE), ультразвукова екстракція (UAE), використання субкритичних рідин та високого гідростатичного тиску. Ці технології є більш ефективними та екологічно стійкими порівняно з класичними методами.

Завдяки прагненню до інновацій та екологічності з'явилися дослідження, що поєднують різні методи для консолідації їхніх переваг. Крім того, розробка новітніх технологій відкрила інвестиційні можливості для промисловості, дозволяючи отримувати специфічні очищені пектинові сполуки з високою доданою вартістю. Хоча початкові витрати на обладнання для мікрохвильової або ультразвукової екстракції можуть бути вищими, зниження споживання енергії, скорочення часу процесу та економія реагентів компенсують ці витрати, забезпечуючи вищий вихід. Таким чином, ці методи є перспективними і можуть бути прибутковими у довгостроковій перспективі.

Нижче розглядаються деякі з цих сучасних методів екстракції пектину.

11.8. Мікрохвильова екстракція (MAE) для пектину

Мікрохвильова екстракція (MAE) є сучасним екологічно чистим методом, який активно застосовується для ефективного виділення пектину з рослинних матеріалів. Метод ґрунтується на використанні полярних розчинників, які

поглинають мікрохвильову енергію, що створюється в електромагнітному полі. На відміну від традиційних методів нагрівання, де тепло передається поступово через стінки ємності, мікрохвилі забезпечують пряме та швидке нагрівання розчинника, завдяки чому процес екстракції стає менш трудомістким і більш контрольованим.

Однією з ключових переваг МАЕ є те, що вона значно зменшує деполімеризацію пектину, яка зазвичай спостерігається під час кислотної екстракції за високих температур і тривалого часу обробки. Збереження структури пектину підвищує його якість та функціональні властивості, зокрема гелеутворювальну здатність та в'язкість.

Крім того, мікрохвильова енергія сприяє руйнуванню клітинних стінок рослинних тканин. Під впливом мікрохвильового випромінювання підвищується внутрішній тиск у клітинах, а температура в середині клітин підвищується дуже швидко, що викликає розрив клітинних оболонок. У результаті пектин ефективно виділяється у розчинник без додаткових механічних або тривалих термічних впливів.

МАЕ також забезпечує економію енергії та скорочення часу процесу. У порівнянні з класичними методами кип’ятіння чи автоклавування, час екстракції може скоротитися в декілька разів, що робить цей метод придатним для масштабного промислового виробництва. Крім того, МАЕ дозволяє використовувати менше розчинника, що зменшує хімічне навантаження та робить процес більш екологічно безпечним.

Завдяки своїй високій ефективності, МАЕ широко застосовується не лише для отримання пектину з цитрусових шкірок, яблучного жому чи бурякових відходів, але й для виділення інших біоактивних полісахаридів із фруктів, овочів та харчових побічних продуктів. Цей метод дає змогу отримувати пектин високої чистоти з кращими фізико-хімічними характеристиками, що особливо важливо для застосування в харчовій, фармацевтичній та косметичній промисловості.

11.9. Ферментна екстракція (ЕАЕ) для пектину

Ферментативна екстракція (ЕАЕ) є сучасним біотехнологічним методом виділення пектину, який покращує процес екстракції завдяки здатності ферментів розчиняти матрицю клітинної стінки рослин. Використання ферментів підвищує проникність клітин, руйнуючи складні полісахаридні компоненти стінки, що полегшує вивільнення пектину у розчинник.

Ефективність ферментативної екстракції залежить від кількох ключових факторів: концентрації ферменту, температури та тривалості реакції, типу застосованого ферменту, а також розміру частинок сировини. Для виділення пектину з клітинних стінок переважно застосовують пектинази, які здебільшого добувають з грибів. Крім пектиназ, у ЕАЕ широко використовуються целюлаза, протеаза, алкалаза, геміцелюлаза, пектинліаза, ксиланаза, α-амілаза, β-глюкозидаза, ендо- та екзополігалактуроназа, а також пектинестераза. Ці ферменти розривають глікозидні зв'язки між мономерами пектину, що призводить до зниження в'язкості розчину та полегшує процеси центрифугування і фільтрації.

За даними досліджень, включаючи роботи Рейн-Кнудсена та інших, основною перевагою ферментативної екстракції є збереження структурних характеристик та функціональних властивостей пектину. ЕАЕ вважається одним із найекологічніших методів екстракції, оскільки зменшує використання агресивних кислот і високих температур, які можуть погіршувати якість пектину.

Водночас існують певні обмеження: видобуток і підготовка ферментів є ресурсомісткими, а контроль ферментативних реакцій на комерційному рівні може бути складним. Різні ферменти по-різному реагують на зміни навколишніх умов, таких як температура, pH і доступність субстрату, що безпосередньо впливає на вихід і якість пектину.

Ферментативна екстракція показала високу ефективність при роботі з різними видами сировини, включаючи цитрусові шкірки, яблучний жом і побічні продукти овочів, дозволяючи отримувати пектин високої чистоти з кращими

гелеутворювальними та функціональними властивостями, що робить його придатним для харчової, фармацевтичної та косметичної промисловості.

11.10. Ультразвукова екстракція (УЕ) для пектину

Звукові хвилі з частотою понад 20 кГц називають ультразвуком. Ультразвукові хвилі в діапазоні від 20 до 100 кГц широко застосовуються в ультразвуковій екстракції (UAE) для виділення пектину та інших біоактивних речовин. Ультразвук знайшов широке застосування у харчовій промисловості завдяки своїм хімічним і фізичним властивостям, здатності полегшувати проникнення розчинника в рослинну тканину та сприяти руйнуванню клітинних структур.

На відміну від електромагнітних хвиль, звукові хвилі потребують середовища для поширення. У процесі UAE ультразвукові хвилі проходять через рідке середовище, створюючи цикли стиснення та розширення. Під час циклу розширення виникають мікропорожнини або бульбашки, які ростуть і врешті руйнуються, коли негативний тиск перевищує локальну міцність рідини на розтяг. Цей процес, відомий як кавітація, є ключовим механізмом ультразвукової екстракції.

Кавітація створює локальні зони високого тиску та температури, що руйнує клітинні стінки рослин, підвищує проникність тканин і сприяє вивільненню пектину у розчинник. Завдяки цьому UAE дозволяє значно скоротити час екстракції, зменшити обсяг необхідного обладнання та енергоспоживання, а також знизити витрати розчинника. Крім того, метод покращує вихід пектину та зберігає його структурні та функціональні властивості.

У порівнянні з традиційними кислотними методами UAE вважається більш екологічним, оскільки зменшує використання агресивних хімічних реагентів і високих температур, що робить його перспективним для промислового виробництва пектину високої якості з побічних продуктів фруктової та овочевої переробки**.**

11.11. Екстракція пектину за допомогою діелектричного бар'єрного розряду

Ще одним перспективним методом виділення пектину є екстракція за допомогою діелектричного бар’єрного розряду (DBD), яка базується на інноваційному застосуванні плазми — четвертого стану речовини. Плазма містить частково іонізовані гази, що складаються з активних частинок, таких як катіони, аніони, електрони, вільні радикали, фотони та атоми газу. Діелектричний бар’єрний розряд є одним із методів генерації холодної плазми, яка відрізняється низькою температурою газу та високою хімічною активністю частинок.

У процесі DBD-плазмової обробки активні компоненти плазми діють на макромолекули рослинних клітин, руйнуючи певні хімічні зв’язки і спричиняючи модифікацію або часткову деградацію таких сполук, як білки та полісахариди. Зокрема, хімічно активні частинки плазми утворюють гідроксильні радикали, які атакують ланцюги пектину, розщеплюючи їх на фрагменти меншої молекулярної маси. Це дозволяє потенційно змінювати фізико-хімічні властивості пектину та модифікувати його структуру без застосування високих температур або великих об’ємів хімічних реагентів.

Хоча DBD-плазма має великий потенціал як екологічно чистий і енергоефективний метод, на сьогодні її застосування для екстракції пектину досліджено дуже мало. Існує обмежена кількість публікацій і експериментальних даних, що пояснює, чому цей метод поки що не набув широкого використання в промисловості. Проте у найближчому майбутньому плазмові технології, включно з діелектричним бар’єрним розрядом, можуть стати перспективним інструментом для цілеспрямованої модифікації структури пектину та підвищення його функціональних властивостей.

11.12. Підкритична водна екстракція для пектину

Підкритична водна екстракція (Subcritical Water Extraction, SWE) передбачає використання води під підвищеним тиском при температурах, що перевищують її нормальну температуру кипіння, без переходу у парову фазу.

Коли вода використовується в таких умовах для виділення біоактивних сполук, процес називають підкритичною водною екстракцією. Цей метод також відомий під іншими назвами: екстракція гарячою водою під тиском (Pressurized Hot Water Extraction, PHWE) або екстракція перегрітою водою (Superheated Water Extraction, SHWE), і він знайшов застосування в харчовій, фармацевтичній та екологічній галузях.

Підвищення температури води під тиском має ряд переваг: знижується в'язкість і поверхневий натяг розчинника, підвищується швидкість масопереносу та коефіцієнт дифузії. Крім того, при високих температурах вода здатна ефективно екстрагувати як неіонні, так і іонні сполуки, оскільки її діелектрична проникність знижується з 79 при 25°C до 33 при 200°C, що покращує розчинність органічних полісахаридів, таких як пектин.

Дослідження показали ефективність SWE для екстракції пектину з різних рослинних джерел. Наприклад, Уено та співавтори порівняли SWE та традиційну кислотну екстракцію для виділення пектину з флаведної частини Citrus junos. Вони встановили, що субкритична вода при 160°C значно прискорює процес екстракції, оскільки висока температура та низька діелектрична проникність води підвищують розчинність пектину. Водночас, при температурах вище 180°C відзначалося зниження виходу через термічну деградацію пектину.

Інші дослідження, зокрема Чен та співавтори, показали, що SWE підвищує ефективність масопереносу та дозволяє уникнути етапу кислотного гідролізу, який характерний для традиційної кислотної екстракції. Цей метод є екологічно чистим, швидким, не потребує органічних розчинників і забезпечує високу якість екстрактів.

Завдяки своїй безпечності (GRAS – Generally Recognized as Safe), підкритична вода вважається придатним розчинником для харчових та фармацевтичних продуктів, включаючи пектин, що робить SWE перспективним і економічно вигідним методом промислового виділення полісахаридів.

11.13. Омічна екстракція для пектину

Омічне нагрівання (Ohmic Heating, OH) — це передова технологія, у якій електричний струм проходить через харчовий матеріал, генеруючи тепло відповідно до закону Джоуля. Завдяки цьому процесу нагрівання відбувається об'ємно, а не лише з поверхні, що робить його швидким, рівномірним і контрольованим.

Цей метод широко застосовується для стерилізації харчових продуктів і для виділення цінних біоактивних сполук з рослинної сировини, зокрема пектину. Об'ємне нагрівання забезпечує ефективну масо- та теплопередачу, що дозволяє мінімізувати термічні коливання та зберегти структурні та функціональні властивості пектину. Крім того, завдяки високій швидкості нагрівання зменшується час обробки, що знижує ризик деградації полісахаридів.

Таким чином, омічне нагрівання є перспективним і практичним методом, здатним підвищувати вихід пектину та покращувати його якість, роблячи процес екстракції більш ефективним та екологічно безпечним.

11.14. Екстракція пектину помірним електричним полем

Екстракція пектину помірним електричним полем (Mild Electric Field Extraction) — це нетермічний метод, який використовує електричне поле низької частоти при відносно низьких температурах. Такий підхід сприяє явищу електропорації, покращуючи проникність клітинних мембран та дифузію внутрішньоклітинних компонентів у розчинник.

Застосування напруги призводить до часткового руйнування клітинних мембран, що дозволяє ефективніше вивільняти пектин і інші полісахариди, одночасно зменшуючи ймовірність небажаних термічних чи хімічних змін у рослинному матеріалі.

Імпульсне електричне поле діє шляхом створення тимчасових пор у цитоплазматичних мембранах, що полегшує екстракцію внутрішньоклітинних речовин без руйнування структури самого рослинного матеріалу, зберігаючи його функціональні та структурні властивості.

11.15. Екстракція пектину методом обробки під високим тиском

Екстракція пектину під високим тиском (High-Pressure Processing, HPP) є одним із поширених нетермічних методів у харчовій промисловості. Процес передбачає герметизацію рослинного матеріалу в спеціальних упаковках і його обробку в камері під ізостатичним тиском понад 300 МПа.

Високий тиск ушкоджує клітинні стінки рослин, що покращує проникність для розчинників, підвищує масообмін та сприяє вивільненню внутрішньоклітинних компонентів, зокрема пектину. Метод може застосовуватися як самостійно, так і в поєднанні з іншими технологіями для синергетичного підвищення виходу пектину та біологічно активних сполук, одночасно скорочуючи час екстракції.

Незважаючи на активні дослідження в лабораторіях щодо новітніх методів екстракції пектину, залишається ряд проблем при промисловому застосуванні. До них належать потреба у висококваліфікованих операторах, значні капітальні витрати та обмежена кількість постачальників спеціалізованого обладнання.

На сьогодні активно вивчаються різні інноваційні технології для вилучення пектину з сільськогосподарських побічних продуктів і харчових відходів, такі як мікрохвильова екстракція, ультразвук, субкритична вода, ферментативні методи, а також термічні та нетермічні технології.

У лабораторних умовах ці методи демонструють багатообіцяючі результати як у плані якості, так і виходу пектину. Проте недостатні знання щодо їх застосування у великому промисловому масштабі та проблеми масштабування все ще можуть стримувати комерціалізацію. Тому вчені та інженери, що працюють у цій галузі, повинні приділяти особливу увагу професійній підготовці та вивченню принципів масштабування технологій.

Якість пектину частково залежить від обраного методу екстракції, оскільки вихід та властивості пектину змінюються залежно від умов процесу, таких як температура, тривалість екстракції, pH та вид сировини. Традиційно пектин екстрагують у кислому водному середовищі за допомогою мінеральних кислот,

таких як азотна, хлоридна або сірчана кислота, фосфорна та лимонна кислота. У промисловому масштабі найпоширенішими методами залишаються кислотна екстракція та осадження спиртом.

Кислотна екстракція ґрунтується на гідролізі протопектину при підвищених температурах. Використання сильних кислот забезпечує високий вихід пектину та скорочення часу екстракції, проте створює серйозні екологічні проблеми, включаючи утилізацію кислих стічних вод, а також значні витрати енергії та хімікатів.

Для покращення екологічності процесу та зменшення шкідливого впливу застосовують харчові органічні кислоти, такі як лимонна, яблучна або винна кислота. Наприклад, при екстракції пектину з ліофілізованої яблучної шкірки використання лимонної кислоти при 85 °C забезпечує вищу молекулярну масу та в’язкість пектину у порівнянні з іншими кислотами. Пектини, виділені органічними кислотами, зазвичай характеризуються високим ступенем метилової естерифікації.

Дослідження показали, що екстракція яблучного пектину за допомогою лимонної кислоти при 5% (мас./об.) і температурі 100 °C протягом 80 хв дає найвищий вихід – 16,8%. Аналогічно, при екстракції какао-лушпиння лимонна кислота при pH 2,5 і 95 °C протягом 3 годин забезпечує вихід пектину 7,62%, що перевищує результати при використанні соляної кислоти.

Хелатні агенти, які застосовуються під час екстракції, також впливають на функціональні властивості пектину, оскільки залишкові сліди можуть залишатися в продукті.

Сучасні методи, такі як ультразвукова (UAE) та мікрохвильова екстракція (MAE), показали покращення процесу. Наприклад, мікрохвильова екстракція пектину з шкірки цитрусових при потужності 360 Вт протягом 3 хв забезпечила вихід 17,97%, тоді як ультразвукова екстракція за 75 °C протягом 45 хв дала 17,30%.

Інші інноваційні методи, такі як електромагнітна індукція, дозволяють значно скоротити час екстракції: екстракція пектину з альбедо цитранжу займала

лише 30 хв, порівняно з 90 хв при звичайному нагріванні, зберігаючи при цьому структуру та якість пектину.

Ферментативна екстракція пектину забезпечує вищий вихід порівняно з традиційними методами, оскільки ферменти розщеплюють пектин шляхом селективної деполімеризації. Цей метод також вважається екологічно безпечним, оскільки не потребує сильних кислот чи органічних розчинників.

Вплив ферменту Celluclast 1.5 L на фізико-хімічні властивості пектину золотистого ківі був оцінений при різних концентраціях (0,1 мл/кг, 1,05 мл/кг та 2,0 мл/кг). Найвищий вихід пектину та в'язкість спостерігали при концентрації 1,05 мл/кг, тоді як при низькій концентрації ферменту вихід був низьким через недостатню активність, а при високій – вихід зменшувався через надмірний гідроліз пектину.

Для порівняння екстракції пектину з раннього та основного врожаю золотого ківі застосовували три методи: кислотний, водний та ферментативний. Ферментативна обробка забезпечила найвищий вихід пектину, проте молекулярна маса екстрагованого пектину була найнижчою.

Контрольовані ферментативні та хімічні модифікації дозволяють отримувати спеціалізовані пектинові сполуки. Наприклад, обробка цитрусового пектину ендо-полігалактуроназою призводить до деградації молекул з отриманням фракцій молекулярною масою від 2 до 60 кДа, а також виявлення неметилестерифікованих олігомерів галактуронової кислоти зі ступенем полімеризації 1–5.

Поєднане використання ендополігалактуронази та пектинліази дозволяє виділити пектини з молекулярною масою 2–21 кДа, що містять як метилестерифіковані, так і неметилестерифіковані полігалактуронани зі ступенем полімеризації 1–6.

Хімічне омилення цитрусового пектину з подальшою обробкою ендо-полігалактуроназою дало суху речовину з 11% виходу та молекулярною масою 2,7 кДа, яка містила олігосахариди пектину зі ступенем полімеризації 1–5.

У порівнянні з кислотною екстракцією, ферментативна обробка забезпечує вищий вихід пектину при нижчій молекулярній масі. Наприклад:

- ✓ Коріння цикорію та пектин цвітної капусти екстрагували ферментом целюлазою, що ефективно гідролізував целюлозу клітинної стінки.
- ✓ Пектин гарбуза, виділений ферментами з Aspergillus awamori, продемонстрував нижчу міцність гелю – близько 10 кПа, що свідчить про зменшення структурної жорсткості гелю.

Пектин зазвичай осаджують осаджувачами залежно від концентрації розчину:

- ✓ Спирт застосовується для концентрованих розчинів пектину (2–4%).
- ✓ Солі алюмінію використовують для розбавлених розчинів (0,3–0,5%).
- ✓ Комерційно для екстракції пектину переважно застосовують органічні розчинники, хоча певною мірою використовуються й солі полівалентних металів.

Досліджували вплив різних осаджувачів – ацетон, ізопропанол, суміш ізопропанол/ацетон 50/50 – на фізико-хімічні та функціональні властивості пектину, екстрагованого з плодів B. aethiopum, при кімнатній температурі та природному pH (5,2–5,5). Найвищу емульгуючу активність та кращі гелеутворювальні властивості показав пектин, осаджений ізопропанолом, порівняно з іншими осаджувачами.

Додавання низькомолекулярних спиртів у концентраціях 1–3% під час кислотної екстракції дозволяло збільшити вихід пектину на 55–90%. Серед них гліцерин, етиленгліколь та діетиленгліколь мали більш виражений ефект порівняно з одноатомними спиртами. Крім того, використання цих спиртів покращувало міцність пектинового гелю.

Для пектину, виділеного зі шкірки галгалу (Citrus pseudolimon Tan.), процес був стандартизований:

- ✓ Осадження етанолом забезпечувало кращу якість пектину порівняно з осадженням хлоридом алюмінію.

- ✓ При осадженні солями алюмінію утворювався пектинат алюмінію, який додатково промивають спиртом для підкислення, а потім нейтралізують слабколужним спиртом.
- ✓ Сіль алюмінію викликала флокуляцію пектину, що сприяло підняттю пектину на поверхню та полегшувало зняття плівки.

11.16. Проблеми екстракції пектину в промислових масштабах

Пектин – це гідроколоїд, відомий своїми унікальними структурними та біохімічними властивостями. Дослідження показали, що пектин має багатофункціональне застосування у різних галузях, що зумовлено його структурою та характером розгалуження полісахаридних ланцюгів. Зміни в структурі пектину можуть виникати як через умови екстракції, так і через джерело сировини, що використовується для його отримання.

У сучасній науці основна увага приділяється екологічно сталому виробництву пектину в промислових масштабах. Проте існує ряд вузьких місць, які обмежують ефективність цього процесу. Серед них – необхідність бланшування та сушіння сировини, використання великої кількості води для екстракції та її подальшої утилізації, а також те, що сировина зазвичай є побічними продуктами переробки фруктів та овочів, що потребує збору та підготовки.

Для створення оптимальних умов екстракції застосовують хімічні речовини та ферменти, а для осадження пектину потрібні надмірні об'єми осаджувачів – від 1,2 до 9,9 л на 10 г пектину. Крім того, процес вимагає значних витрат енергії через використання механічного подрібнення, ліофілізації та нагрівання сировини.

Раніше пектин переважно екстрагували методом кислотної гарячої екстракції при температурі 80–100 °C з тривалим часом (30–180 хв), використовуючи хлоридну, азотну або сірчану кислоту. Ці методи були корозійними, небезпечними, мали значний негативний вплив на довкілля та забезпечували низький вихід пектину.

У зв’язку з цими недоліками були розроблені нові протоколи екстракції, що модифікують традиційні методи з метою підвищення якості та виходу пектину, одночасно зменшуючи негативний вплив на навколишнє середовище та споживання ресурсів.

Мільйони тон помідорів (Lycopersicon esculentum Mill.) щорічно переробляються для виготовлення таких продуктів, як томатний сік, паста, пюре, кетчуп, соуси та сальса, що призводить до утворення значної кількості відходів. Основні томатні відходи після пресування плодів складаються з 33% насіння, 27% шкірки та 40% м’якоті, тоді як сушені томатні вичавки містять приблизно 44% насіння та 56% суміші м’якоті й шкірки.

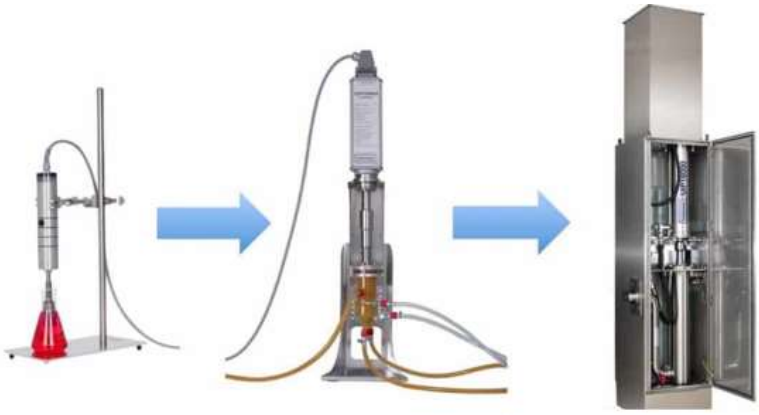
Ці відходи є цінним джерелом пектину, який має широке застосування в харчовій промисловості. Пектин з томатних відходів можна використовувати як загущувач, гелеутворювач або емульгатор в кондитерських виробах, джемах, желе, напоях та соусах. Крім того, томатний пектин може бути задіяний у виробництві функціональних та біоактивних продуктів, завдяки своїм харчовим і технологічним властивостям, таким як високий вміст галактуронової кислоти, здатність до гелеутворення та утворення стабільних емульсій.

Використання томатних відходів для екстракції пектину не лише зменшує екологічне навантаження, пов’язане з утилізацією харчових відходів, а й відкриває нові промислові можливості, забезпечуючи джерело сировини з високою доступністю та низькою собівартістю. Таким чином, томатні відходи стають перспективним матеріалом для виробництва пектину у комерційних масштабах, особливо в умовах зростаючого попиту на природні харчові полімери та функціональні інгредієнти.

Протоколи «зеленої» екстракції та сучасні методи, такі як ультразвукова або мікрохвильова екстракція, стають перспективною альтернативою традиційним методам. Вони забезпечують зниження споживання енергії та хімічних реагентів, скорочують час екстракції та підвищують безпеку процесу. Такі методи сприяють сталому вилученню пектину, мінімізуючи вплив на навколишнє середовище та використання агресивних хімічних речовин.

Незважаючи на ці переваги, для розробки ефективних, надійних, економічних, відтворюваних та екологічно безпечних протоколів екстракції пектину все ще потрібні додаткові дослідження. Сучасні перспективні підходи включають використання глибоких евтектичних розчинників та екологічно чистих кислот, таких як лимонна кислота, отримана з органічних джерел або вироблена мікроорганізмами, наприклад, Aspergillus niger. Ці замінники звичайних мінеральних кислот дозволяють ефективно знижувати pH для екстракції та додатково підтримують сталий і безпечний процес отримання пектину.

Ультразвукові гомогенізатори – це пристрої, які використовують ультразвукові хвилі високої частоти (зазвичай >20 кГц) для інтенсивного перемішування, диспергування або руйнування частинок у рідких середовищах. Вони широко застосовуються в харчовій, фармацевтичній та біотехнологічній промисловості, зокрема для екстракції пектину та інших біологічно активних сполук.



а б в

Рис. 42. Ультразвукові гомогенізатори:
а – ультразвуковий лабораторний пристрій; б – настільний ультразвуковий апарат; в – промисловий ультразвуковий апарат [41]

Основні принципи роботи: *Кавітація* – при проходженні ультразвукових хвиль через рідину утворюються мікропухирці, які швидко ростуть і вибухають, створюючи локальні високі тиск і температуру. *Механічне руйнування* – кавітаційні ефекти пошкоджують клітинні стінки рослинної сировини, підвищуючи проникність і полегшуючи дифузію розчинника. *Поліпшена масопередача* – активізація контакту розчинника з екстрагованою речовиною, що підвищує вихід пектину та скорочує час екстракції.

Переваги використання ультразвукових гомогенізаторів: зменшення часу екстракції; підвищення виходу пектину та збереження його функціональних властивостей; мінімізація використання розчинників; екологічність та енергозбереження у порівнянні з традиційними методами нагрівання.

Ультразвукові гомогенізатори можуть використовуватися як окремо, так і в комбінації з іншими методами, наприклад ферментативною або кислотною екстракцією, для отримання високоякісного пектину з фруктових та овочевих відходів.

Ультразвуковий екстрактор – це спеціалізований прилад, призначений для інтенсивної екстракції біологічно активних сполук, таких як пектин, з рослинної сировини за допомогою ультразвукових хвиль високої частоти. Ультразвуковий екстрактор UIP4000hdT – це екстрактор потужністю 4 кВт для промислового виробництва пектину.

Принцип роботи:

Генерація ультразвукових хвиль – пристрій створює коливання у діапазоні 20–100 кГц.

Кавітація – хвилі викликають утворення мікропухирців у рідкому середовищі. Пухирці ростуть і вибухають, що спричиняє локальні високі температуру та тиск.

Механічне руйнування клітин – кавітаційні ефекти руйнують клітинні стінки рослинної сировини, збільшуючи проникність і вивільнення пектину в розчинник.

Покращена масопередача – інтенсивне перемішування підвищує контакт розчинника з матеріалом, що підвищує ефективність екстракції.



Рис. 43. Ультразвуковий екстрактор UIP4000hdT [42]

Основні переваги: підвищений вихід пектину порівняно з традиційними методами; скорочений час екстракції (з кількох годин до десятків хвилин); менше використання розчинників; збереження функціональних властивостей пектину (структура, в'язкість, гелеутворювальні властивості); екологічність та енергозбереження; можливість поєднання з ферментативними або кислотними методами для підвищення ефективності.

Застосування: Екстракція пектину з цитрусових відходів, яблучних вичавок, томатних залишків; Виділення інших біологічно активних полісахаридів та фітокомпонентів; Використовується в харчовій, фармацевтичній та біотехнологічній промисловості.

Екстракція пектину з рослинної сировини та побічних продуктів харчової промисловості є важливим процесом для отримання цінного біополімеру з різноманітними функціональними властивостями. Традиційні методи кислотної гарячої екстракції забезпечують високий вихід пектину, але характеризуються тривалим часом обробки, високим споживанням енергії та хімічних реагентів, а також негативним впливом на навколишнє середовище.

Новітні «зелені» методи екстракції, такі як ультразвукова, мікрохвильова, ферментативна, субкритична водна та обробка під високим або електричним полем, демонструють значні переваги. Вони забезпечують скорочення часу екстракції, підвищення виходу пектину, збереження його структурних та функціональних властивостей, а також зменшують споживання розчинників і енергії.

Особливе значення мають комбіновані підходи, що поєднують кілька методів для максимізації ефективності, і використання екологічно чистих реагентів, таких як органічні кислоти чи глибокі евтектичні розчинники. Проте на промисловому рівні ще існують виклики, пов'язані з високою вартістю обладнання, потребою у спеціалізованих операторах та обмеженою кількістю постачальників.

З огляду на сучасні тенденції, дослідження та впровадження стійких, ефективних і безпечних методів екстракції пектину залишаються перспективним напрямом, що дозволяє отримувати продукт високої якості для харчової, фармацевтичної та біотехнологічної промисловості з меншим впливом на довкілля.

11.17. Взаємодія пектину

11.17.1. Розчинність та диспергованість

Гідроколоїди пектину зазвичай класифікують залежно від їхньої розчинності в різних середовищах на водорозчинні, хелаторно-розчинні та розведені лугорозчинні фракції. Водорозчинний пектин містить молекули, які є неіонними та нековалентно пов'язаними з клітинними стінками рослин.

Хелаторно-розчинний пектин можна екстрагувати за допомогою імідазолу; у цьому випадку полімери пектину утримуються іонними зв’язками з клітинною стінкою, наприклад, через іони кальцію.

Розведені лугорозчинні фракції пектину складаються з полісахаридів, які ковалентно зв’язані ефірними зв’язками з клітинною стінкою. Розчинність пектину зростає зі збільшенням ступеня метилювання, але зменшується при збільшенні розміру полімеру.

Деградація пектину та зміна його розчинності можуть відбуватися внаслідок β-елімінування, що є більш інтенсивним у слабкокислих і нейтральних умовах, а також при підвищених температурах.

Під час реакції β-елімінування відбувається розрив глікозидного зв’язку в положенні С-4 та видалення атома водню з положення С-5 галактуронової кислоти, що призводить до утворення подвійного зв’язку. Інтенсивність цієї реакції підвищується зі збільшенням pH і температури, високим ступенем метилювання, а також при наявності одновалентних солей та ЕДТА.

> **ЕДТА (етилендіамінтетраоцтова кислота)** — це органічна сполука, яка належить до групи четириосновних карбонових кислот. Вона широко відома як хелатуючий агент, оскільки здатна утворювати стійкі та водорозчинні комплекси з іонами металів.

У контексті пектину ЕДТА використовується для видалення двовалентних іонів кальцію та магнію, які можуть утворювати нерозчинні зв’язки між молекулами пектину. Це дозволяє підвищити розчинність пектину, полегшити його екстракцію та покращити гелеутворювальні властивості.

11.17.2. Гелеутворення

Гелеутворення можна визначити як процес, який включає часткове розчинення та часткове осадження полімерних розчинів. Структура та властивості пектину, такі як гелеутворююча здатність та в'язкість, значною мірою залежать від джерела сировини та методу екстракції.

Гелеутворення пектином визначається такими факторами, як структура пектину, концентрація цукру, pH, температура та наявність зшиваючих агентів. Гелі фізично характеризуються тривимірною мережею зшитих полімерних молекул, яка утримує воду та молекули розчинених речовин.

Високометоксилований пектин використовується для приготування цукерок та продуктів середньої вологості, що потребують довготривалої стабільності навіть за високих температур. Його гелеутворення забезпечується водневими зв'язками та гідрофобними силами, які не залежать від температури. Високометоксилований пектин утворює гель при високих концентраціях цукру (>55%) та у кислих умовах (pH <3,5). У таких умовах електростатичне відштовхування між пектиновими ланцюгами слабке через зменшення дисоціації карбоксильних груп галактуронових кислотних ланок. Гідратація молекул пектину зменшується зі збільшенням концентрації цукру.

Низькометоксилований та амідований пектин формує гель за іншим механізмом, оскільки водневі зв'язки в ньому відсутні. Міжмолекулярні зв'язки відбуваються через утворення димерів за участю двовалентних катіонів (Ca^{2+}, Fe^{2+}, Zn^{2+}), що формують зшивання між двома карбоксильними групами, відоме як модель «яєчної коробки».

Низькометоксилований пектин утворює гелі при вищому pH (3–7), і для цього не потрібно додавати цукор, на відміну від високометоксилованого пектину.

11.17.3. Розщеплення пектину

Пектинові полімери зазвичай характеризуються високим ступенем метилестерифікації, що визначає їх фізико-хімічні властивості, такі як розчинність у воді, гелеутворювальна здатність та взаємодія з іонами. Через це пектин є природною цільовою молекулою для дії пектинолітичних ферментів, які отримують переважно з грибів і мікроорганізмів. До таких ферментів належать пектинметилестерази (ПМЕ), полігалактуронази та пектинліази, кожен із яких має специфічний механізм дії та впливає на структуру пектину та клітинних стінок рослин.

Пектинолітичні ферменти здатні руйнувати складні полісахаридні ланцюги пектину, що призводить до значних змін у механічних властивостях клітинних стінок рослин. Такі зміни включають зменшення міцності клітинної стінки, що полегшує виділення соку, а також може впливати на термін зберігання продуктів та їхню текстуру. Внаслідок дії ферментів відбувається часткова деполімеризація пектину, що змінює його молекулярну масу та в'язкість, а отже, і його функціональні характеристики у харчових та технологічних процесах.

Зокрема, пектинметилестерази каталізують реакцію деметилестерифікації, при якій метилові групи, приєднані до С-6 карбоксильних груп галактуронової кислоти в пектині, гідролізуються. Цей процес призводить до вивільнення метанолу та збільшення кількості вільних карбоксильних груп у пектині, що змінює його хімічні властивості, здатність до іонного зв’язування з двовалентними катіонами (наприклад, Ca^{2+}) та гелеутворювальну активність.

У промисловому виробництві фруктових соків та концентратів застосування пектинолітичних ферментів дозволяє регулювати помутніння та каламутність соку, підвищувати його прозорість, покращувати смакові характеристики та значно підвищувати вихід соку. Крім того, ферментативна обробка зменшує в’язкість суспензії, що полегшує процеси центрифугування та фільтрації.

Сумарно, використання пектинолітичних ферментів дозволяє досягти більш контрольованого та ефективного виділення пектину та інших цінних компонентів з фруктових та овочевих сировин, одночасно забезпечуючи високу якість кінцевого продукту та підвищуючи економічну ефективність промислових процесів.

11.18. Потенційне застосування пектину

Пектин – це багатофункціональний гідроколоїд, який знаходить широке застосування у різних галузях завдяки своїм унікальним фізико-хімічним та біохімічним властивостям. Можливості використання пектину надзвичайно широкі і охоплюють харчовий сектор, охорону здоров’я та фармацевтику, а також упаковку харчових продуктів.

11.18.1. Харчова промисловість

У харчовій промисловості пектин застосовується як гелеутворювач, загущувач, стабілізатор та емульгатор у різних продуктах. Його додають у джеми, желе та мармелад, де пектин формує стабільний гель з водою та цукром. У напоях і соках пектин контролює в'язкість і помутніння, а також покращує стабільність суспензій. У молочних продуктах, таких як йогурти та десерти, пектин створює кремоподібну текстуру та стабілізує структуру. Пектин також використовується для регулювання текстури та збереження смакових якостей у різних продуктах харчування, що робить його незамінним інгредієнтом у сучасній харчовій промисловості.

Джеми, желе та емульгатори. Пектинові гідроколоїди є ключовим інгредієнтом при приготуванні харчових продуктів середньої вологості, таких як джеми, желе, мармелад, кондитерські вироби, тістечка та йогурти, завдяки їхнім універсальним желюючим властивостям. Пектин зазвичай додають наприкінці технологічного процесу, що зменшує вплив високої температури та забезпечує повне й рівномірне розчинення.

Високометоксильований пектин застосовується як желюючий і текстуруючий агент у джемах та желе. Зростання популярності продуктів без цукру або з низьким вмістом цукру, таких як дієтичні джеми та газовані напої, обумовлене потребами споживачів, які слідкують за калоріями, а також потребами діабетиків. Це призвело до підвищеного попиту на низькометоксильований пектин.

Для таких споживачів був розроблений мармелад із мальтитом та амідованим цитрусовим пектином (низькометоксильний пектин), який не поступається комерційному мармеладу за текстурою та органолептичними властивостями.

Пектин цукрового буряка, хоча погано утворює гелі, добре працює як емульгатор у системах олія/вода. Він діє, покриваючи молекули ліпідів, захищаючи їх від контакту з водою та запобігаючи злипанню, що дозволяє

стабілізувати емульсії та підтримувати рівномірний розподіл гідрофобних частинок у водному середовищі.

Хлібобулочні вироби. Пектин також привернув увагу пекарів завдяки своїм унікальним властивостям. Його можна використовувати як структуроутворювач у тісті, підсилювач окислювального ефекту під час його приготування, а також як сорбент для покращення якості хлібобулочних виробів.

Споживання продуктів, збагачених пектиновими речовинами, стає важливою складовою раціону, оскільки такі продукти підвищують стійкість організму до несприятливих умов навколишнього середовища та сприяють зв'язуванню токсинів, що потрапляють з їжею або утворюються в організмі.

Було встановлено, що пектин впливає на процеси бродіння, біохімічні та мікробіологічні процеси в тісті, а також підвищує пружність клейковини. У виробництві хліба пектин сприяє збільшенню об'єму тіста, утримуючи гази, зберігаючи структуру та запобігаючи процесу черствіння. Зокрема, при додаванні пектину до композитного борошна з пшениці, кукурудзи та маніоки об'єм хліба збільшувався до 13%.

Пектинові гідроколоїди покращують об'єм хліба переважно за рахунок підвищення утримання вологи та поліпшення в'язкопружних властивостей тіста. Додавання високометоксильованого пектину до пшеничного хліба сприяло отриманню виробів із більшим питомим об'ємом, м'якшою м'якушкою та покращеними властивостями утримання вологи.

Пребіотичні властивості. Пектин та пектинові олігосахариди, що складаються з галактуронової кислоти (GalA), рамнози (Rha), арабінози (Ara) та галактози (Gal), застосовуються як пребіотичні субстрати через здатність стимулювати ріст і активність корисних кишкових бактерій. Дослідження зі змодельованим шлунково-кишковим трактом показали, що введення пектину призводить до значного збільшення кількості біфідобактерій у 1000 разів, бактероїдів у 100 разів та фекалобактерій у 10 разів.

Олігосахариди, отримані з пектину, виробляються шляхом деполімеризації очищеного пектину або часткового ферментативного гідролізу сировини. Ці

пектинові олігосахариди демонструють пребіотичну активність, сприяючи росту корисної мікрофлори у товстій кишці та захищаючи від патогенних мікроорганізмів.

Пектин та харчові волокна надають організму численні переваги, включаючи покращення моторики кишечника, уповільнення спорожнення шлунка, зниження всмоктування глюкози та холестерину, а також збільшення калової маси. Крім того, пектин стійкий до дії ферментів слини, шлункової кислоти, пепсину, трипсину та сичужного ферменту.

Пектин, отриманий з різних джерел, таких як яблука або цитрусові, є цінним джерелом вуглецю для росту та розвитку корисної кишкової мікрофлори, що підкреслює його значення як функціонального харчового інгредієнта.

Стабілізація кисломолочних продуктів. Пектин широко застосовується як стабілізатор у кисломолочних продуктах у молочній промисловості. Низькоестерифікований пектин зазвичай використовується у виробництві знежиреного йогурту, оскільки він зменшує синерезис завдяки взаємодії з молочними білками. Ця взаємодія забезпечує формування однорідної та стабільної текстури продукту.

Високоестерифікований пектин краще підходить для підкислених молочних напоїв. При низькому pH молочний білок стабілізується завдяки електростатичним взаємодіям між позитивно зарядженими білками та негативно зарядженим пектином. Нейтральні ділянки високометоксильованого пектину утворюють багаті на ентропію петлі, що відштовхують білкові молекули, тим самим сприяючи стабільності суспензії.

Додавання пектину покращує органолептичні властивості йогурту, збільшуючи його в'язкість і забезпечуючи захоплення летких ароматичних сполук у матриці продукту. Пектин має високу здатність до утримання води, що також зменшує синерезис. Агреація казеїнових молекул може призводити до осадження частинок молока, проте пектин, завдяки своїм гомогалактуроновим доменам, зв’язується з частинками білка, запобігаючи їх злипанню та осадженню.

Утворення стабільної твердої матриці в йогурті відбувається через взаємопроникнення гідратованих ланцюгів низькометоксильованого пектину в білкову мережу та стеричну стабілізацію. Пектин адсорбується на поверхні агрегатів казеїну через карбоксильні групи, а катіони, головним чином двовалентні мінерали, такі як кальцій, виконують роль «містка», що підвищує стабільність і структуру продукту.

Подібні взаємодії кальцію з пектином також мають значення для біологічної активності: вони сприяють адгезії пробіотичних бактерій до епітеліальних клітин шлунково-кишкового тракту, подібно до того, як кальцій допомагає з'єднувати негативно заряджені мікроорганізми з поверхнею епітелію. Таким чином, пектин не лише стабілізує кисломолочні продукти, а й може покращувати функціональні властивості пробіотичних культур.

11.19. Охорона здоров'я та фармацевтика

11.19.1. Зниження концентрації ЛПНЩ у плазмі

Було встановлено, що пектин відіграє важливу роль у зниженні рівня ліпопротеїнів низької щільності (ЛПНЩ) у плазмі крові у людей. Дослідження показали, що при споживанні 15 г пектину на день протягом 4 тижнів спостерігалося зниження концентрації холестерину ЛПНЩ у крові приблизно на 3–7%. Це свідчить про потенційний кардіопротекторний ефект пектину, який може бути корисним у профілактиці серцево-судинних захворювань.

> **ЛПНЩ** у плазмі, або ліпопротеїни низької щільності, є одним із видів жирів, що переносяться в крові. Їх часто називають «поганим» холестерином, оскільки високий рівень ЛПНЩ сприяє утворенню атеросклеротичних бляшок у судинах, що підвищує ризик серцево-судинних захворювань. Було встановлено, що пектин відіграє важливу роль у зниженні концентрації ЛПНЩ у плазмі.

Пектин зменшує всмоктування холестерину завдяки своїй здатності покривати міцели, запобігаючи їх злипанню та створюючи електростатичне відштовхування між ними. Це підвищує в'язкість у шлунково-кишковому тракті,

знижуючи засвоєння холестерину з жовчі або їжі. Крім того, пектин перешкоджає розщепленню жирних кислот жовчними кислотами на дрібні фрагменти, необхідні для всмоктування в стінку кишечника. Ефективність цього механізму також залежить від джерела пектину: було встановлено, що яблучний та цитрусовий пектин більш ефективно знижують рівень ЛПНЩ у плазмі, ніж пектин, отриманий із апельсинової м'якоті.

11.19.2. Антиоксидантна активність

Антиоксидантні властивості пектину обумовлені його здатністю хелатувати іони металів, що беруть участь у процесах окислення. Ця здатність значною мірою залежить від джерела сировини, методу екстракції та ступеня естерифікації (DE) пектину. Завдяки цим властивостям пектин можна використовувати для зменшення потреби в синтетичних антиоксидантах і створення харчових продуктів із «чистою етикеткою», додаючи його до емульсій як натуральний стабілізатор та антиоксидант.

Було проведено дослідження з модифікації цитрусового пектину, в якому оцінювали вплив ступеня естерифікації на окислювальну стабільність емульсій, зокрема на емульсії на основі олій льону та соняшнику. Виявилося, що ступінь естерифікації безпосередньо впливає на антиоксидантну активність: низькометоксильований пектин (DE ≤ 33%) демонструє значно вищий потенціал ліпідного антиоксиданту порівняно з високометоксильованим пектином (DE ≥ 58%). Таким чином, низькометоксильований пектин може ефективно замінювати синтетичні антиоксиданти в харчових продуктах, покращуючи їхню стабільність та одночасно відповідаючи сучасним вимогам споживачів щодо натуральності та безпечності продуктів.

11.19.3. Терапевтичне та фармацевтичне використання

Пектин ефективно використовується для боротьби із запорами, такими як низька моторика кишечника, сухий стілець та болісна дефекація, завдяки здатності поглинати воду в кишечнику. Це відбувається через набухання пектину

та утворення водневих зв'язків у водному середовищі, що призводить до збільшення об'єму кишкового вмісту. Дослідження показали, що пероральне введення пектину мишам підвищувало водоутримуючу здатність калу, збільшуючи його водний вміст до 26%, що спричиняло протизапорний ефект in vivo.

Пектинові гідроколоїди також застосовуються як засоби для загоєння ран, оскільки вони здатні абсорбувати ранові ексудати, запобігаючи надмірному накопиченню рідини, та одночасно підтримують вологе середовище, що стимулює синтез колагену і диференціацію клітин. Загоєння та регенерацію клітин можна контролювати за допомогою пектину, навантаженого лікарськими засобами або факторами росту. Крім того, дисоціація пектину обмежує мікробну активність, створюючи кисле середовище.

Пектин проявляє вищу ефективність у комбінації з іншими біоактивними матеріалами. Наприклад, комплекс пектин–мед показав кращі результати загоєння у щурів порівняно з пектином окремо та контролем. Антибактеріальні та гігроскопічні властивості меду та пектину сприяють підтриманню низького pH, формуючи оклюзійний каркас, що полегшує епітелізацію клітин. Водневі взаємодії між пектином і муцином покращують його адгезію до поверхні рани. Ця властивість є особливо корисною у системах доставки лікарських засобів, подовжуючи час перебування препарату на місці рани та підвищуючи ефективність лікування.

Високо розгалужена структура RG-I підвищує стійкість Ca^{2+}-пектинових частинок до дії шлунка та тонкого кишечника, що робить їх перспективними носіями для доставки ліків у товсту кишку.

11.19.4. Глікемічний контроль

Пектин демонструє численні корисні для здоров'я ефекти, зокрема зниження рівня глюкози та холестерину в крові, зменшення калорійності споживаної їжі завдяки посиленому відчуттю ситості, а також покращення інсулінової резистентності. Він проявляє позитивний вплив у профілактиці та лікуванні

захворювань, пов’язаних зі способом життя, таких як діабет і ожиріння. Шкірка та насіння сої, що залишаються як побічний продукт переробки, є цінним джерелом пектину та харчових волокон. Пектин не розщеплюється ферментами шлунка чи підшлункової залози, а його ферментація відбувається лише у товстій кишці; завдяки цьому менше молекул їжі засвоюється організмом, що знижує підвищення рівня глюкози в крові. Було проведено дослідження споживання порошку нестиглих яблук, багатого на пектин, щоб оцінити його гіпоглікемічну активність у здорових добровольців. Після вживання цього продукту спостерігалося покращення метаболізму глюкози, зокрема збільшення її виділення з сечею, що дозволяє зробити висновок: яблучний пектин може застосовуватися для зниження постпрандіальної глікемії та підтримки контролю діабету.

11.19.5. Пектин як інкапсулюючий агент

Пектин здатний безпосередньо взаємодіяти з компонентами їжі, утворюючи захисний шар, подібно до інших біополімерів, таких як хітозан та альгінат, які також застосовуються для інкапсуляції та покриття. Він використовувався окремо або у комбінації з іншими біополімерами для інкапсуляції харчових продуктів з метою маскування неприємного запаху деяких біологічно активних сполук, наприклад риб’ячого жиру, або для захисту летких і чутливих компонентів від несприятливих умов навколишнього середовища. Нещодавні дослідження показали, що ефективність інкапсуляції мальтодекстрину можна підвищити шляхом формування комплексу з високометоксипектином для покриття зеленого лушпиння волоських горіхів. Було встановлено, що поєднання пектину з мальтодекстрином забезпечує вищу антибактеріальну активність проти Bacillus cereus та Staphylococcus aureus порівняно з використанням лише мальтодекстрину, що, ймовірно, зумовлено кращим захистом компонентів та контрольованим вивільненням зеленого лушпиння волоських горіхів за рахунок пектину.

11.19.6. Зв'язувальні властивості металу

Пектин запобігає всмоктуванню металів, оскільки здатний зв’язуватися з ними у травному тракті. Його часто застосовують перорально для виведення важких металів та зменшення всмоктування свинцю, а також зниження рівня стронцію в кістках і крові. Для лікування отруєнь токсичними металами використовують специфічні хелатори; проте вони можуть викликати побічні ефекти, такі як переміщення металів у мозку або кістках, а також зниження концентрації життєво важливих мінералів, що негативно впливає на функції шлунково-кишкового тракту та може спричиняти шкірний дискомфорт. Полісахариди пектину взаємодіють з металами ефективніше, ніж хелатори, завдяки своїй тривимірній структурі. Механізм зв’язування металів пектином базується на моделі «яєчної коробки»: естерифіковані залишки є неактивними, тоді як негативно заряджені вільні карбоксильні групи молекул пектину формують ковалентні зв’язки з валентними іонами металів.

11.20. Упаковка харчових продуктів

Пектин також має важливе застосування в харчовій промисловості для виготовлення їстівних покриттів і пакування продуктів завдяки здатності утворювати гелі та плівки. Такі матеріали вважаються екологічно чистими та сталими альтернативами, що має важливе значення для розвитку стійкого виробництва. Хоча комерційно широко використовуються нафтові полімери для пакування та їстівних покриттів, їх застосування пов’язане з швидким виснаженням природних ресурсів. Пектинові покриття є відновлюваними, біорозкладними та біосумісними, а дослідження показують, що вони здатні подовжувати термін зберігання продуктів порівняно з нафтовими полімерними матеріалами. Плівки та покриття відіграють ключову роль у збереженні харчових продуктів, контролюючи втрату вологи, підтримуючи твердість і зменшуючи гниття фруктів. Їстівні пектинові плівки обмежують фізіологічну деградацію фруктів під час зберігання, модифікуючи навколишню атмосферу та знижуючи

рівень кисню всередині плодів, що сповільнює процес дозрівання і зберігає біоактивні сполуки.

11.20.1. Пакувальна плівка

Пектин здатний утворювати гелі та надавати їм необхідної твердості, що широко використовується для виготовлення плівок у харчовій упаковці. Процес гелеутворення залежить від наявності іонів кальцію, кислот або цукрів. Такі пектинові плівки виконують роль бар'єру між зовнішнім і внутрішнім середовищем, запобігаючи псуванню продуктів. У сучасній харчовій промисловості властивості пектину модифікують шляхом додавання спеціальних добавок під час формування плівок, що дозволяє підвищити їх міцність на розрив і подовжити термін зберігання упакованих продуктів.

Пектин сам по собі має обмежену ефективність для виготовлення плівок, оскільки такі плівки крихкі, гідрофільні та характеризуються низькими механічними властивостями. Це обмежує їх застосування для упаковки харчових продуктів. Щоб поліпшити характеристики пектинових плівок, їх функціоналізують за допомогою біологічно активних добавок, таких як ефірні олії, наночастинки, вільні жирні кислоти та деякі фенольні сполуки. Ці добавки не лише покращують механічні властивості плівки, але й надають їй антимікробної активності. У такій конструкції пектин виступає матрицею, що захоплює та утримує біологічно активні сполуки, формуючи функціональну плівку.

Пластифікатори — це низькомолекулярні сполуки, які додаються до розчину під час формування біополімерних плівок для покращення їх властивостей. Вони збільшують міжланцюгові відстані полімерів, надаючи плівці гнучкості та зменшуючи її твердість і когезію. Найпоширеніші GRAS-пластифікатори (Generally Recognized As Safe) включають сорбіт, гліцерин, сахарозу, поліетиленгліколь, маніт та інші. Ці речовини покращують гнучкість полімерного ланцюга, зменшують деформацію, твердість, в'язкість, щільність та електростатичний заряд плівки. Крім того, вони сприяють утворенню водневих

зв’язків між макромолекулами, знижуючи міжмолекулярну взаємодію. Пластифікатори повинні мати низький тиск пари, низьку швидкість дифузії та сумісність з полімером.

Для отримання плівок часто використовують сумішеві композиції, додаючи пектин до інших полісахаридів або білків для досягнення бажаних властивостей, що особливо актуально для харчової упаковки. Найпоширеніші методи виготовлення плівок включають лиття з розчинника та екструзію/змішування. Метод лиття передбачає повне диспергування біополімеру та добавки у відповідному розчиннику, після чого суміш заливають, сушать і отримують плівку, наприклад, у чашці Петрі. Екструзія є промислово масштабованим процесом, у якому активні сполуки змішують із біополімером всередині екструдера, а плівки формують шляхом стиснення, видування або плавлення.

Наприклад, було виготовлено їстівну плівку на основі водної емульсії низькометоксильованого пектину (LMP, 1%) з очищеними соняшниковими восками (0,3%), яка демонструє низьку швидкість паропередачі та високу водостійкість.

Наночастинки, ефірні олії та інші біоактивні компоненти активно досліджуються через їх антибактеріальну та протигрибкову активність проти різних харчових патогенів. У пектинових плівках часто використовують різні функціональні біоактивні агенти, щоб надати їм додаткових функціональних властивостей. Наприклад, плівки на основі суміші пектину та агару з додаванням наночастинок меланіну та екстракту виноградних кісточок продемонстрували значну антиоксидантну та антимікробну активність проти різних харчових патогенів. У іншому дослідженні для покращення антибактеріальної дії плівки застосовували наночастинки сульфіду цинку. Додаток карваколу та циннамальдегіду до пектинових плівок виявився ефективним для подовження терміну зберігання шинки та болонської ковбаси. Крім того, плівки з екстрактом шкірки лайма та кокосовою водою застосовувалися для уповільнення окислення

соєвої олії. Пектинова плівка, змішана з олією кориці, також показала ефективність у затримці росту мікроорганізмів у сухому тофу під час зберігання.

11.20.2. Матеріал покриття

Пектинові покриття останнім часом привертають значну увагу у харчовій промисловості. Їх можна наносити за допомогою різних методів, таких як занурення, розпилення, електророзпилення або метод дражування. Існує численна література про застосування пектину та функціональних біоактивних сполук як покривних матеріалів для подовження терміну зберігання фруктів, м'яса та інших харчових продуктів.

Наприклад, пектинові покриття з ефірами орегано та лимона застосовували для яблучних скибочок, і дослідження показало, що вони зменшують кількість мікробів та втрату ваги яблук. Аналогічно, пектинові покриття з олією кориці використовували для винограду, що сприяло подовженню терміну зберігання, зменшенню росту грибків і підвищенню антиоксидантної активності. Розчин пектину з ефірами орегано та ресвератролом застосовували для покриття свинячої вирізки, що ефективно зменшувало окислення ліпідів і обмежувало ріст мікроорганізмів.

Пектинове покриття на основі яблучного пектину, функціоналізоване лимонним ефіром міді, використовували для зберігання полуниці, що дозволило значно продовжити термін її зберігання. Дослідження також показали, що додавання лимонного та м'ятного ефірів міді до пектинового покриття ефективно зменшує окислення та допомагає підтримувати текстуру і колір райдужної форелі під час зберігання.

11.21. Перспективи на майбутнє

Пектин є багатофункціональним природним полісахаридом, що широко застосовується як текстуризатор, стабілізатор та емульгатор у харчовій промисловості, а також у фармацевтичній, косметичній та біомедичній сферах. Його здатність формувати гелі, плівки та покриття робить його універсальним

компонентом для створення продуктів із заданими текстурними, фізико-хімічними та функціональними властивостями. Особливий інтерес представляє використання пектину як замінника жирів і цукру у низькокалорійних та функціональних продуктах харчування, що зростає в умовах глобальної тенденції до здорового способу життя.

Хоча пектин присутній у великій кількості рослин, комерційно доступні джерела його екстракції залишаються обмеженими. Це обумовлює потребу у пошуку нових джерел або модифікації існуючих для отримання пектину з оптимальними фізико-хімічними та функціональними характеристиками. Дослідження гелеутворюючої здатності пектину, його взаємодії з іонами кальцію та іншими біополімерами, а також фізико-хімічних властивостей матеріалу дозволяє значно розширити сферу його застосування у харчовій та фармацевтичній промисловості.

Пектин має важливе значення у фармацевтичній галузі завдяки здатності сприяти загоєнню ран, проявляти синергетичний ефект із лікарськими препаратами та служити матрицею для контрольованого вивільнення активних сполук. Сучасні дослідження молекулярних механізмів гелеутворення пектину допомагають краще зрозуміти взаємодію його карбоксильних та метоксильних груп із іонами та іншими компонентами, що визначає його функціональні властивості.

Особливу увагу приділяють пектиновим плівкам та покриттям, які використовуються як їстівні бар’єри для подовження терміну зберігання фруктів, овочів, м’яса та інших харчових продуктів. Завдяки гелеутворюючій здатності пектину ці плівки контролюють втрату вологи, обмежують окислення ліпідів та уповільнюють ріст мікроорганізмів. Для покращення механічних властивостей та стійкості до води плівки модифікують за допомогою пластифікаторів (гліцерин, сорбіт, маніт, поліетиленгліколь) та біоактивних компонентів (ефірні олії, наночастинки, фенольні сполуки, жирні кислоти). Такі модифікації підвищують гнучкість і міцність плівки, а також надають їй антибактеріальної та антиоксидантної активності.

Різноманітні методи виготовлення пектинових плівок, включаючи лиття з розчинника, екструзію, змішування та електророзпилення, дозволяють адаптувати технологічний процес під промислові потреби. Наприклад, плівки на основі суміші пектину та агару з додаванням наночастинок меланіну або екстракту виноградних кісточок демонструють високу антиоксидантну та антимікробну активність. Плівки з наночастинками сульфіду цинку або ефірними оліями ефективно уповільнюють ріст мікробів у харчових продуктах. Покриття на основі пектину з ефірами орегано, лимона, кориці чи ресвератролом продемонстрували ефективність у продовженні терміну зберігання яблук, полуниці, винограду, свинячої вирізки та риби, зменшуючи окислення ліпідів і підтримуючи текстуру та колір продуктів.

Дослідження біосинтезу пектину у рослинах, його метаболізму у людей та тварин, а також пошук нових джерел і методів екстракції є надзвичайно важливими для подальшого розвитку індустрії пектину. Ринок пектину та пектинових гідроколоїдів постійно зростає та має значний економічний потенціал. Подальші наукові дослідження, спрямовані на вдосконалення методів аналізу структури, властивостей та функціональної активності пектину, є необхідними для оптимізації його застосування у харчовій, фармацевтичній та нехарчовій промисловості, а також для розробки нових функціональних продуктів і матеріалів.

11.21.1. Перспективи використання пектину в харчовій промисловості

Використання пектину як текстуризатора та стабілізатора. Пектин є природним полісахаридом із високою гелеутворюючою здатністю, що робить його незамінним компонентом у виробництві джемів, желе, мармеладів, соусів, йогуртів, морозива та інших харчових продуктів. Він забезпечує стабільність текстури, однорідність продукту та контроль над механічними властивостями, такими як твердість, в’язкість та пластичність. Важливо, що гелеутворення пектину може регулюватися шляхом зміни ступеня метоксилювання, концентрації цукру та наявності іонів кальцію, що дозволяє створювати

продукти із заданими характеристиками, адаптовані під різні харчові формати та споживчі вимоги.

Пектин як замінник жирів та цукру. У низькокалорійних продуктах пектин використовується як замінник жиру та цукру, зберігаючи при цьому приємну консистенцію та смак продукту. Його здатність утворювати гель забезпечує відчуття ситості, що є корисним у функціональному харчуванні та продуктах для контролю ваги. Крім того, пектин знижує глікемічний індекс продуктів, що робить його перспективним для розробки харчових продуктів для діабетиків та людей, які стежать за рівнем глюкози в крові.

Інкапсуляція та доставка біоактивних компонентів. Пектин використовується як матриця для інкапсуляції біоактивних сполук, включаючи пробіотики, антиоксиданти, вітаміни, мінерали, ферменти та ефірні олії. Інкапсуляція дозволяє захистити чутливі компоненти від окислення, теплового та хімічного руйнування під час виробництва та зберігання продуктів. Також завдяки контролю вивільнення пектин може забезпечувати цільову доставку активних речовин у шлунково-кишковому тракті, що підвищує їх біодоступність та ефективність.

Розробка їстівних плівок та покриттів. Пектин активно використовується для створення їстівних плівок і покриттів, що продовжують термін зберігання фруктів, овочів, м'яса, риби та молочних продуктів. Плівки на основі пектину контролюють втрату вологи, обмежують окислення ліпідів, уповільнюють дихання плодів та ріст мікроорганізмів. Додавання пластифікаторів (гліцерин, сорбіт, маніт, поліетиленгліколь) покращує гнучкість і механічні властивості плівок, тоді як біоактивні добавки, такі як ефірні олії, фенольні сполуки та наночастинки, надають антимікробної та антиоксидантної активності. Це відкриває нові можливості для створення упаковок, що одночасно є безпечними, екологічними та функціональними.

Антибактеріальна та антиоксидантна функціональність. Пектин можна функціоналізувати шляхом введення активних компонентів, що забезпечують антибактеріальні та антиоксидантні властивості продукту.

Наприклад, плівки, збагачені ефірними оліями (кориця, орегано, лимон) або екстрактами рослин (виноградні кісточки, шкірка цитрусових), демонструють високу ефективність у продовженні терміну зберігання та захисті продуктів від мікробного псування. Це дозволяє зменшити використання хімічних консервантів і покращує безпеку харчових продуктів.

Розширення асортименту функціональних продуктів. Пектин відкриває можливості для створення нових функціональних харчових продуктів із корисними для здоров'я властивостями: контроль рівня цукру в крові, зниження рівня холестерину, підвищення відчуття ситості, підтримка мікрофлори кишечника. Завдяки цьому пектин стає важливим компонентом у розробці продуктів для спеціалізованого харчування, зокрема для діабетиків, людей із серцево-судинними захворюваннями та тих, хто дотримується дієти для контролю ваги.

Екологічні та сталий розвиток. Їстівні пектинові плівки та покриття є біорозкладними та відновлюваними, що робить їх привабливими для екологічно чистих технологій пакування. Використання пектину як альтернативи синтетичним полімерним пакувальним матеріалам дозволяє зменшити навантаження на довкілля та сприяє сталому розвитку харчової промисловості.

Нові технології екстракції та модифікації пектину. Перспективи розвитку пектину у харчовій галузі також пов'язані з удосконаленням методів його екстракції та модифікації. Сучасні технології, такі як ультразвукова, мікрохвильова, ферментативна екстракція, підкритична водна екстракція та імпульсне електричне поле, дозволяють підвищити вихід пектину, зберегти його функціональні властивості та скоротити використання хімічних реагентів. Це сприяє більш ефективному та екологічно чистому виробництву.

Комбіноване використання з іншими біополімерами. Пектин активно комбінують із іншими полісахаридами (альгінати, агар, ксантан) та білками (казеїн, соєвий білок) для створення сумішей із покращеними механічними та бар'єрними властивостями. Це дозволяє розширити сферу застосування пектину, зокрема у виробництві пакувальних матеріалів, структурованих десертів,

низькокалорійних продуктів та продуктів із контрольованим вивільненням біоактивних речовин.

Перспективи ринку та економічні аспекти. Попит на пектин у харчовій галузі постійно зростає. Основними факторами є: збільшення виробництва функціональних та низькокалорійних продуктів, розвиток екологічних упаковок, розширення ринку біоактивних добавок та інкапсуляцій. Інноваційні продукти на основі пектину можуть забезпечити конкурентні переваги для виробників та задовольнити вимоги споживачів щодо безпечності, корисності та екологічності харчових продуктів.

11.21.2. Розширення асортименту функціональних продуктів із використанням пектину

Пектин є багатофункціональним природним полісахаридом, що надає харчовій промисловості унікальні можливості для створення функціональних продуктів. Його властивості дозволяють формувати структуру, стабілізувати текстуру, контролювати в'язкість і взаємодіяти з іншими компонентами харчових систем. Використання пектину у виробництві продуктів з додатковою користю для здоров'я відкриває перспективи розширення асортименту, включаючи продукти з контролем глікемії, зниженням холестерину, підвищенням відчуття ситості та антиоксидантними властивостями.

Одним із ключових напрямів є створення продуктів із регульованим глікемічним індексом. Пектин уповільнює всмоктування глюкози завдяки утворенню гелеподібної матриці у шлунково-кишковому тракті. Це дозволяє виробляти десерти, напої та низькокалорійні снекові продукти для людей із цукровим діабетом або тих, хто прагне підтримувати стабільний рівень глюкози. Такі продукти поєднують приємну текстуру, смакові якості та користь для здоров'я, що робить їх привабливими для сучасних споживачів.

Іншим перспективним напрямом є використання пектину для зниження рівня холестерину. Розчинний пектин здатний зв'язувати жовчні кислоти та сприяти їх виведенню, що призводить до зменшення рівня холестерину у крові.

Це відкриває можливості створення функціональних молочних продуктів, батончиків і харчових добавок для підтримки серцево-судинного здоров'я, зменшення ризику атеросклерозу та інших захворювань серця.

Пектин також сприяє контролю апетиту та підтримці маси тіла. Завдяки своїй гелеутворювальній здатності він збільшує об'єм їжі у шлунку, що викликає відчуття ситості. Це властивість дозволяє розробляти низькокалорійні десерти, функціональні батончики та напої, які ефективно зменшують потребу у додаткових калоріях, допомагаючи контролювати вагу та сприяти здоровому харчуванню.

Пектин також виступає як пребіотик, підтримуючи ріст корисної мікрофлори в кишечнику, такої як Lactobacillus та Bifidobacterium. Це дозволяє створювати йогурти, ферментовані молочні продукти, напої та харчові добавки, які покращують травлення, підвищують імунітет та сприяють нормалізації кишкової мікробіоти. Використання пектину у таких продуктах відкриває шлях до розвитку інноваційного сегменту «мікробіом-фокусованого» харчування.

Антиоксидантні властивості пектину, особливо у поєднанні з рослинними екстрактами, поліфенолами та ефірними оліями, дозволяють створювати продукти із підвищеною здатністю до нейтралізації вільних радикалів. Це включає десерти, напої, смузі та харчові добавки, які допомагають знижувати оксидативний стрес, підтримувати клітинне здоров'я та попереджувати хронічні захворювання, пов'язані з окисленням ліпідів.

Пектин активно використовується для виробництва інкапсульованих продуктів. Його здатність формувати матрицю для вітамінів, мінералів, ферментів, антиоксидантів та пробіотиків забезпечує контрольоване вивільнення активних компонентів, покращує їхню стабільність та біодоступність. Це дозволяє створювати функціональні харчові продукти, які не тільки мають приємний смак і текстуру, але й виконують терапевтичну або оздоровчу функцію.

Ключовим напрямом є застосування пектину для створення їстівних плівок та покриттів, які подовжують термін придатності фруктів, овочів, м'яса та риби.

Такі плівки контролюють втрату вологи, обмежують окислення ліпідів та уповільнюють ріст мікроорганізмів. Додавання пластифікаторів і біоактивних компонентів, таких як ефірні олії, наночастинки та фенольні сполуки, покращує механічні властивості, гнучкість та антимікробну активність плівок. Це дозволяє виробляти високоякісні продукти з подовженим терміном зберігання та підвищеною безпекою харчування.

Завдяки унікальній здатності взаємодіяти з іншими біополімерами (альгінат, агар, ксантан) та білками (казеїн, соєвий білок), пектин дозволяє створювати складні функціональні харчові системи. Такі комбіновані продукти мають покращені текстурні та бар'єрні властивості, здатні підтримувати стабільність біоактивних речовин і забезпечувати контрольоване вивільнення нутрієнтів.

Таблиця 25 – Функціональні продукти на основі пектину

Тип продукту	**Цільове призначення**	**Механізм дії пектину**	**Приклади продуктів**	**Очікуваний ефект для здоров'я**
Діабетичні продукти	Контроль рівня глюкози	Уповільнює всмоктування глюкози, утворює гелеподібну матрицю у кишечнику	Джеми без цукру, низькокалорійні десерти, смузі, батончики	Зниження постпрандіальної глікемії, контроль цукру в крові
Продукти для серцево-судинного здоров'я	Зниження холестерину	Зв'язує жовчні кислоти та сприяє їх виведенню	Батончики, функціональні молочні продукти, харчові добавки	Зменшення рівня LDL, підтримка здоров'я серця, профілактика атеросклерозу
Продукти для контролю апетиту та ваги	Сприяє ситості та зменшенню калорійності	Гелеутворення в шлунку, збільшення об'єму їжі	Низькокалорійні десерти, батончики, напої для схуднення	Зменшення апетиту, контроль ваги, підтримка здорового харчування
Пребіотичні продукти	Підтримка кишкової мікрофлори	Стимулює ріст Lactobacillus, Bifidobacterium	Йогурти, ферментовані молочні продукти, напої, харчові добавки	Покращення травлення, імунітету та здоров'я кишечника

Тип продукту	Цільове призначення	Механізм дії пектину	Приклади продуктів	Очікуваний ефект для здоров'я
Антиоксидантні продукти	Захист від оксидативного стресу	Інкапсуляція поліфенолів, рослинних екстрактів, антиоксидантів	Батончики, десерти, смузі, напої	Зменшення оксидативного стресу, підтримка клітинного здоров'я, попередження хронічних захворювань
Інкапсульовані продукти	Контрольоване вивільнення нутрієнтів	Формує матрицю для вітамінів, мінералів, ферментів, пробіотиків	Капсули, порошки, функціональні добавки	Підвищення біодоступності, стабільність активних компонентів, терапевтичний ефект
Їстівні плівки та покриття	Подовження терміну зберігання	Контроль вологості, окислення, ріст мікроорганізмів; модифікація гнучкості та міцності	Покриття фруктів, овочів, м'яса, риби; функціональні десерти	Подовження терміну зберігання, антибактеріальна та антиоксидантна дія, покращення текстури
Комбіновані харчові системи	Поліпшення текстури та бар'єрних властивостей	Взаємодія з іншими полісахаридами та білками; контрольоване вивільнення нутрієнтів	Желатинові десерти, батончики, смузі з багатофункціональним ефектом	Стабільність біоактивних компонентів, покращена текстура, функціональна цінність продукту
Екологічно чисті продукти	Сприяння сталому розвитку	Використання біорозкладного та відновлюваного пектину замість синтетичних полімерів	Натуральні десерти, покриття, упаковки для фруктів та овочів	Зменшення впливу на довкілля, відповідність трендам екологічності та здорового харчування

Розширення асортименту функціональних продуктів із використанням пектину також відповідає сучасним трендам сталого розвитку та екологічності. Природний пектин є біорозкладним і відновлюваним матеріалом, що дозволяє

зменшити використання синтетичних загущувачів та нафтових полімерів, роблячи продукцію більш екологічно дружньою.

З огляду на зростання попиту на здорове харчування, спеціалізовані та низькокалорійні продукти, ринок пектину має значний економічний потенціал. Використання пектину для створення нових функціональних продуктів відкриває можливості для інновацій, підвищення конкурентоспроможності та задоволення потреб сучасних споживачів у безпечній, здоровій та функціональній їжі.

Питання для самоконтролю

1. Як Американське хімічне товариство класифікує пектинові сполуки?
2. Що таке пектин?
3. Що мають на увазі під «ланцюгами пектину»?
4. За якими ознаками розрізняють види пектину?
5. З якої сировини виготовляють пектин?
6. Які методи екстракції пектину застосовують у промисловому виробництві?
7. Якими властивостями повинна володіти сировина для ефективного вилучення пектину?
8. Які методи вважаються більш стійкими та ефективними порівняно з класичною екстракцією пектину?
9. Як впливає мікрохвильове опромінення на процес екстракції пектину?
10. Що таке ферментативна екстракція пектину?
11. На якому принципі базується ультразвукова екстракція пектину?
12. Як відбувається екстракція пектину за допомогою діелектричного бар'єрного розряду?
13. Що розуміють під підкритичною водною екстракцією пектину?
14. Як омічне нагрівання впливає на екстракцію пектину?
15. За рахунок якого ефекту відбувається екстракція пектину в імпульсному електричному полі?

16. Як високий тиск сприяє інтенсифікації процесу екстракції пектину?

17. Які осаджувачі застосовують під час екстракції пектину?

18. Які існують проблемні моменти або обмеження у процесі екстракції пектину?

19. З яких компонентів складається водорозчинний пектин?

20. Яким чином пектин використовується у харчових продуктах?

21. Що означає поняття «пектин як інкапсулюючий агент»?

22. Завдяки яким властивостям пектин застосовують у пакувальних матеріалах?

Рекомендована навчальна література

1. Прибильський В. Л. Технологія пектину : навч. посіб. / В. Л. Прибильський, В. Г. Співак. Київ : НУХТ, 2011. 185 с.

2. Фурсік О. В. Технологія структурованих харчових продуктів : навч. посіб. / О. В. Фурсік, В. М. Пасічний. Київ : НУХТ, 2018. 164 с.

3. Технологія консервування плодів та овочів : підручник / О. Ю. Романова, О. П. Самойленко, Н. М. Прутенко та ін. ; за ред. О. Ю. Романової. Київ : НУХТ, 2015. 434 с.

4. Ситник Н. В. Хімія харчових продуктів : навч. посіб. / Н. В. Ситник. Київ : Кондор, 2017. 320 с.

5. Технологія переробки вторинної сировини плодоовочівництва : навч. посіб. / уклад.: О. В. Самохвал, Н. П. Фролова. Полтава : ПУЕТ, 2016. 142 с.

6. Павлюк Р. Ю. Інноваційні технології переробки овочів та фруктів : монографія / Р. Ю. Павлюк та ін. Харків : ХДУХТ, 2017. 248 с.

7. Pectins and Pectinases / ed. by H. A. Schols, R. G. Visser, A. G. Voragen. Wageningen : Academic Publishers, 2009. 420 p.

8. Pectin: Technological and Physiological Properties / ed. by V. Kontogiorgos. Cham : Springer Nature, 2020. 256 p.

9. Pectin: Extraction, Purification and Applications / ed. by B. S. Dhillon. New York : Nova Science Publishers, 2016. 184 p.

10. Pectin: A Versatile Polysaccharide in Pharmaceutical Applications / ed. by M. A. Vandamme, S. S. Shahi. London : Academic Press, 2021. 310 p.

Розділ 12. ПОЛІСАХАРИДИ З МОРСЬКИХ ВОДОРОСТЕЙ

12.1. Види морських водоростей

Морські водорості є цінним біологічним ресурсом, багатим на біоактивні сполуки, такі як полісахариди, поліфеноли, білки, пігменти, жирні кислоти, поліаміни, терпеноїди та алкалоїди, які знаходять застосування у харчовій та нехарчовій промисловості. Вибір методу екстракції істотно впливає на кількість і якість цих біоактивних компонентів. Особлива увага приділяється екологічно чистим методам екстракції, оскільки вони є безпечними, доступними та ефективними. Цей огляд узагальнює сучасні підходи до отримання максимальної та стійкої кількості біоактивних сполук із морських водоростей за допомогою методів, таких як рідинна екстракція під тиском, ультразвукова екстракція, мікрохвильова екстракція, ферментативна екстракція та екстракція надкритичною рідиною. При виборі екологічно чистого методу важливо враховувати конкретну біоактивну ціль, щоб процес був максимально ефективним та результативним.

Щорічно у світі збирають приблизно 32 млн тон морських водоростей (у вологій вазі), з яких близько 1 млн тон добувають у дикій природі, а решта 31 млн тон отримують із культивованих водоростей. Найбільшими виробниками є Китай, Індонезія та Філіппіни. В Європі переважає збір у дикій природі, зокрема Норвегія є одним із провідних виробників. Проте інтерес до культивування морських водоростей у Європі зростає, хоча поки що виробництво невелике – менше 2000 тон, переважно великі бурі ламінарії, такі як Saccharina latissima, Undaria pinnatifida та Alaria esculenta.

Серед видів морських водоростей, що культивуються у дикій природі, найважливішими є червоні водорості: Eucheuma spp. (10,2 млн тон), Gracilaria spp. (3,9 млн тон), Kappaphycus spp. (1,8 млн тон) та Porphyra spp. (норі, 1,2 млн тон), а також бурі водорості: Saccarina japonica (8,0 млн тон) та Undaria pinnatifida (вакаме, 2,3 млн тон).

Морські водорості, що продукують полісахариди, є одними з найпоширеніших джерел біомолекул. Полісахариди, які вони містять, являють собою складні макромолекули, що складаються з великої кількості моносахаридних одиниць, з'єднаних глікозидними зв'язками. Вміст та склад полісахаридів залежать від виду водоростей і умов їх зростання.

Класифікація полісахаридів здійснюється за кількома критеріями. За складом моносахаридів полісахариди поділяються на гомополісахариди, які утворені одним типом моносахаридних одиниць, та гетерополісахариди, що складаються з різних типів моносахаридів. За структурою ланцюга виділяють лінійні полісахариди, які мають прямий нерозгалужений ланцюг, і розгалужені полісахариди, що містять бокові гілки та утворюють складні тривимірні структури.

Різні види морських водоростей містять різний рівень полісахаридів. Найбільшу концентрацію полісахаридів мають червоні морські водорості, де їх частка коливається від 38 до 74% сухої маси. Бурі та зелені водорості зазвичай містять менше полісахаридів, однак їхній склад часто багатий на специфічні функціональні групи, що визначають їхнє промислове та фармацевтичне застосування.

Полісахариди морських водоростей виконують різноманітні функції. Вони можуть застосовуватися як загусники, стабілізатори, агенти для утворення гелів, а також використовуватися у виробництві біоактивних речовин та фармацевтичних препаратів. Висока концентрація полісахаридів у червоних водоростях робить їх особливо цінними для промислового виробництва та харчових, медичних і косметичних продуктів.

Полісахариди морських водоростей мають ключове значення для комплексного використання водоростевих ресурсів. Більшість із них добре розчиняються у воді, а наявність сульфатних груп у структурі окремих сполук зумовлює їхню здатність утворювати в'язкі розчини, гелі або щільні структури. Саме ці властивості роблять водоростеві полісахариди надзвичайно цінними для харчової, фармацевтичної та біотехнологічної галузей.

За походженням полісахариди морських водоростей поділяють на три основні групи: полісахариди Rhodophyta (червоні водорості), Fucophyta (бурі водорості) та Chlorophyta (зелені водорості). Кожна з цих груп характеризується специфічним хімічним складом і функціональними властивостями, що визначає напрямки їх практичного використання.

До основних промислово значущих полісахаридів належать агар, альгінати та карагенани, які широко застосовуються як загусники, стабілізатори та гелеутворювачі. Крім них, у водоростях містяться й інші важливі полісахариди — целюлоза, фукоїдан (на основі фукози), флоридеанський крохмаль, ламінарин та ксилани, що мають біологічну активність і перспективи використання у фармацевтичних, медичних та функціональних харчових продуктах.

Полісахариди з червоних морських водоростей. Червоні водорості є найдавнішим відділом серед морських макрофітів з точки зору філогенезу. Основним структурним компонентом їхніх клітинних стінок та міжклітинної матриці є сульфатований галактан, що визначає хімічні та функціональні властивості цих організмів.

Серед важливих полісахаридів червоних водоростей — агар-агар та карагенан. Обидва мають порівняно лінійну структуру та схожі функціональні характеристики, завдяки чому широко використовуються як загусники, стабілізатори і гелеутворювачі в харчовій, фармацевтичній та біотехнологічній промисловості.

Окрім агару та карагенану, деякі види червоних водоростей містять порфіран та ксилан. Порфіран — це сульфатований полісахарид, виділений з різних видів Porphyra, який структурно подібний до агару та розглядається як цінне харчове волокно. Біологічна функція ксилану поки що залишається маловивченою, однак він потенційно може відігравати важливу роль у метаболічних та структурних процесах водоростей.

Полісахариди з бурих морських водоростей. Бурі морські водорості є другим за поширеністю типом морських водоростей після червоних. Їх характерний зелено-коричневий колір обумовлений присутністю фукоксантину

та поліфенольних сполук, що виконують захисну функцію та надають водоростям антиоксидантні властивості.

Основними полісахаридами бурих водоростей є фукоїдани, ламінарин та альгінат, які формують структуру клітинних стінок і надають їм механічну міцність. Ці полісахариди відзначаються високим антиоксидантним та противірусним потенціалом, завдяки чому знаходять застосування у фармацевтичній, косметичній та харчовій промисловості як біоактивні компоненти.

Особливості хімічної структури цих полісахаридів також роблять їх корисними для створення гелеутворюючих, загущувальних і стабілізуючих агентів у різних біотехнологічних застосуваннях.

Полісахариди із зелених морських водоростей. Зелені морські водорості часто спричиняють явище цвітіння води, яке може негативно впливати на місцеві екосистеми, особливо у водах, багатих на поживні речовини, часто внаслідок антропогенної діяльності. Проте користь зелених водоростей значно переважає їх потенційно шкідливий вплив, оскільки вони мають широкий спектр застосувань у харчовій, фармацевтичній та косметичній промисловості.

Зелені водорості легко культивуються у частково штучному середовищі, що робить їх стабільним та доступним ресурсом. Наприклад, види Ulva містять ульвани — сульфатовані полісахариди з різноманітними біологічними функціями, включно з антиоксидантною та імуномодулювальною активністю.

Крім того, деякі зелені водорості, такі як Codium bursa, містять жирні кислоти з помітною протигрибковою активністю, що робить їх перспективними для створення біоактивних компонентів у медичних і косметичних продуктах.

12.2. Продовольча безпека: морські водорості як харчовий ресурс

Морські водорості традиційно вживаються в їжу переважно у країнах Східної Азії, тоді як у західних країнах їх споживання значною мірою обмежене. Статистичні дані показують, що в Японії середнє споживання морських

водоростей на душу населення становить 5,5 г сухої ваги на добу, що є найвищим показником у світі.

Завдяки багатому складу мікро- та макронутрієнтів морські водорості можна розглядати як важливий компонент раціону людини та популяризувати їхнє використання у харчуванні. Однією з можливих стратегій для зменшення стресу на глобальні продовольчі ресурси, спричиненого зростанням чисельності населення, є поступове збільшення споживання морських водоростей у світі до половини рівня споживання на душу населення в Японії. Це може стати внеском у досягнення цілі «Нульовий голод».

Проте така оцінка споживання базується здебільшого на кількісному аналізі харчових потреб зростаючого населення, при цьому майже не враховується виробнича потужність та темпи розвитку галузі морських водоростей. Для досягнення навіть половинного рівня споживання японського рівня до 2050 року виробництво морських водоростей має зрости приблизно втричі, що передбачає щорічне зростання на 7,41%, тоді як протягом останніх двох десятиліть воно зростало в середньому лише на 6,2% на рік.

Незважаючи на це, включення морських водоростей у раціон людини хоча б частково може зменшити підвищений попит на традиційні сільськогосподарські культури та, у підсумку, позитивно вплинути на глобальну продовольчу безпеку.

Морські водорості у харчуванні тварин і виробництві м'яса. Морські водорості можуть відігравати важливу роль у вирішенні проблем глобальної продовольчої безпеки, зокрема у підвищенні ефективності виробництва м'яса. Дослідження показали, що додавання у раціон 5% азолли (водної рослини) та 3% ульви молочної (Ulva spp.) значно збільшило приріст маси тіла курчат протягом 60 днів — з 568,7 г до 816,4 г — та зменшило коефіцієнт конверсії корму з 4,76 до 3,39. Таким чином, включення морських водоростей у корм не лише підвищує вихід м'яса, але й покращує ефективність використання кормових ресурсів.

Подібні результати були підтверджені експериментами на бройлерних курчатах. Раціони, що містили 5–10 г/кг суміші морських водоростей, у складі

рівних пропорцій двох коричневих, однієї зеленої та двох червоних водоростей, значно покращили ріст курчат та вихід м'язів грудей. Аналогічний ефект спостерігався і у курей-несучок: додавання 2–3% борошна зелених морських водоростей (Ulva spp.) до комерційного раціону сприяло підвищенню споживання корму та загальної маси тіла птиці.

Ці ефекти можна посилити за допомогою екстрактів морських водоростей. Наприклад, 5 г екстракту на кг корму для свиней збільшили масу забою з 90,97 кг до 92,38 кг, одночасно зменшивши загальне споживання корму на відгодівлю. Крім того, екстракт позитивно впливав на здоров'я кишечника поросят, пригнічуючи розвиток кишкової палички та стимулюючи ріст корисних бактерій, таких як Lactobacillus spp.

Таким чином, морські водорості та їхні екстракти можуть бути ефективним природним інгредієнтом для підвищення продуктивності та здоров'я тварин, одночасно сприяючи більш стійкому та економічному виробництву м'яса.

Екстракти морських водоростей як біостимулятори сільськогосподарських культур. Рідкі екстракти морських водоростей демонструють значний потенціал як біостимулятори росту рослин, що допомагає підвищити врожайність та якість сільськогосподарської продукції, одночасно підтримуючи стале виробництво продовольства. На відміну від багатьох сучасних мінеральних добрив, такі екстракти є нетоксичними, біорозкладними та екологічно чистими, що робить їх безпечним та сталим інструментом підвищення продуктивності культур.

Дослідження показали, що додавання 250 мл екстракту Ascophyllum nodosum до курячого гною кожні два тижні значно збільшувало кількість плодів помідорів та масу свіжих плодів перцю. Подібний стимулюючий ефект спостерігався і на зернових культурах, де екстракт Ecklonia maxima підвищував довжину коренів, ріст насіннєвих коренів та вагу розсади машу і кукурудзи при концентрації 10^{-6} М.

Обробка культур позакореневим обприскуванням 20+20% (об./об.) рідинами для переробки кисню, що містять Padina boergesenii (Phaeophyceae) та

Gracilaria edulis (Rhodophyta), синергічно стимулює ріст рослин, покращує якість врожаю та підвищує врожайність проса.

Що стосується олійних культур, екстракти Sargassum spp. сприяють збільшенню вмісту хлорофілу в листках, інтенсивності фотосинтезу, накопиченню сухої речовини, висоті головного стебла та довжині бічних гілок арахісу. Аналогічно, застосування екстрактів морських водоростей у дозі 2 мл/л для рослин коріандру значно підвищує врожайність, вміст білка, кількість ефірних олій та вихід олії.

Таким чином, використання морських водоростей як ефективного, екологічного та сталого добрива має далекосяжне значення для підвищення продовольчої безпеки, економічної ефективності та збереження екології.

12.3. Здоров'я та благополуччя: біологічна користь морських водоростей для людини та тварин

Морські водорості містять велику кількість необхідних поживних речовин та біологічно активних сполук, які сприятливо впливають на здоров’я людини. Додавання до раціону 6% Sargassum horneri сприяє поліпшенню стану при ожирінні, викликаному високожировою дієтою, завдяки регуляції пов’язаних з цим метаболічних порушень. Крім того, цей вид водоростей пригнічує розвиток діабету та стеатозу печінки у мишей, зменшуючи активність панкреатичної ліпази та знижуючи всмоктування ліпідів у кишечнику.

Останні дослідження також свідчать про позитивний вплив морських водоростей на психічне здоров’я. Зокрема, споживання понад 2 г їстівних морських водоростей на 1000 ккал на день асоціювалося зі значним зменшенням частоти депресивних симптомів, що вказує на потенційну роль водоростей у підтримці емоційного благополуччя.

Що стосується здоров’я тварин, морські водорості можуть модулювати кишкову мікрофлору у птиці та худоби, покращуючи їх імунну відповідь. Наприклад, додавання 1% Undaria pinnatifida до раціону свиней підвищувало активність природних клітин-кілерів у периферичній крові, демонструючи

виражений імуномодулюючий ефект. Таким чином, морські водорості можуть бути корисним інгредієнтом як у харчуванні людей, так і у тваринництві, впливаючи на обмін речовин, імунітет та психічний стан.

12.4. Екосистемні функції

Морські водорості виконують важливі функції в екосистемах океанів. Вони здатні синтезувати органічний вуглець під час фотосинтезу, використовуючи неорганічний вуглець, що значно підвищує здатність океану поглинати CO_2 та сприяє пом'якшенню глобальної зміни клімату. За статистичними оцінками, світові спільноти морських водоростей можуть засвоювати близько 1,5 петаграмів вуглецю щороку, що становить приблизно 10% від щорічних викидів вуглецю від автомобільного транспорту.

Морські водорості також виконують роль природного «океанського фільтра», покращуючи якість прибережних вод. Наприклад, у Китаї морські водорості, вирощені в аквакультурі, видалили 9 592 т фосфору та 75 563 т азоту, поглинули 539 555 тон вуглецю та 5 809 тон йоду з прибережних вод. Це значною мірою допомогло зменшити серйозні проблеми евтрофікації, з якими стикається країна.

З точки зору Цілей сталого розвитку ООН, морські водорості отримали високу оцінку за внесок у «Життя під водою». Вони збагачують біорізноманіття, формуючи нові біотопи та забезпечуючи середовище існування для численних водних організмів. Дослідження також підкреслюють роль морських водоростей у живленні травоїдних риб на коралових рифах, що сприяє збільшенню видового багатства в харчовому ланцюзі та формуванню нових біоценозів.

Крім екологічного значення, морські водорості можуть мати суттєвий вплив на зменшення викидів парникових газів від тваринництва. Відомо, що гази, що утворюються під час кишкової ферментації жуйних тварин, відповідають приблизно за 16% світових викидів метану. Додавання морських водоростей до раціону жуйних тварин може істотно зменшити утворення цього парникового газу. Так, введення Asparagopsis taxiformis (Rhodophyta) у змішаний

раціон з високим вмістом зерна у кількості всього 0,2% призвело до зниження викидів CH_4 в кишечнику на 98% та H_2 на 1700%. Ці результати відкривають перспективу створення сталого виробництва вуглецево-нейтрального червоного м'яса без погіршення його харчових властивостей.

12.5. Біоенергія

Морські водорості мають великий потенціал як джерело газоподібного біопалива третього покоління у формі біометану. Вони вважаються стійким джерелом енергії, оскільки їх вирощування не займає сільськогосподарські угіддя та не впливає на виробництво продовольства. Було оцінено потенціал біометану для десяти різних видів морських водоростей. Завдяки значно вищій врожайності порівняно з рідким біопаливом першого покоління, наприклад біодизелем із пальмової олії, морські водорості демонструють великий валовий вихід енергії.

Проте початкові оцінки часто спиралися лише на кількісний аналіз енергетичної продуктивності і не враховували економічну доцільність їх комерційного використання. Оптимізація технологічних процесів і підвищення ефективності виробництва значно покращили економічну привабливість біоенергетики, отриманої з морських водоростей.

Цікаво, що морські водорості можуть відігравати і непряму роль у виробництві морської вітрової енергії. Це пов'язано з тим, що ферми з вирощування водоростей можуть бути інтегровані з рибними господарствами та морськими вітровими електростанціями. Така концепція багаторазового використання морського простору дозволяє одночасно оптимізувати виділені площі для уловлювання вуглецю та сприяє збільшенню кількості ліцензій на будівництво морських вітрових електростанцій, забезпечуючи синергію між різними відновлюваними джерелами енергії.

12.6. Процеси екстракції гідроколоїдів морських водоростей

У традиційних методах екстракції полісахаридів мацерація морських водоростей здійснюється у воді при підвищених температурах. Технологія екстракції може змінюватися залежно від виду полісахаридів та їх подальшого застосування. Перед проведенням екстракції необхідно ретельно очистити водорості від епіфітів, сторонніх домішок, солей, піску, токсинів та інших забруднювачів.

Для агару та карагенану застосовують попередню обробку лужними розчинами, що покращує їхні гелеутворювальні властивості. Це дозволяє відновити нестабільні молекули сульфату до форми 3,6-ангідро-L-галактопіранози (3,6-AG), яка є важливою для формування стійкого гелю.

Щоб підвищити вихід альгінату та видалити пігменти, що надають тканинам морських водоростей забарвлення, його попередньо обробляють формальдегідом. Додатково застосовується обробка соляною кислотою для виявлення фенольних сполук та залишків формальдегіду, а також для перетворення нерозчинних солей кальцію, магнію та інших елементів у розчинні форми, що сприяє більш ефективному вилученню альгінату.

Для отримання карагенану та агару зазвичай застосовують послідовну екстракцію гарячою водою з подальшою обробкою лугом. Це дозволяє виділити молекули з необхідними фізико-хімічними властивостями та функціональними характеристиками. Регулювання таких параметрів, як час екстракції, pH розчину, концентрація розчинника та температура, дає змогу контролювати структуру полісахаридів і оптимізувати їх гелеутворювальні та інші технологічні властивості.

Вибір між лужною та водною екстракцією агару значною мірою залежить від конкретного виду водоростей. Так, для Gracilaria spp. лужна обробка є необхідною для утворення 3,6-ангідрогалактози — ключового компонента, який забезпечує формування міцного агарового гелю. Натомість для Gelidium spp. така обробка не обов’язкова, оскільки ці види природно містять достатню кількість структурно стабільних молекул для формування гелю.

Щодо карагенану, лужна обробка не є обов'язковою для його екстракції, проте вона може застосовуватися для підвищення міцності утворюваного гелю. Таким чином, вибір технологічного підходу дозволяє адаптувати процес екстракції залежно від виду водоростей та бажаних фізико-хімічних властивостей кінцевого продукту.

Температура екстракції гідроколоїдів залежить від конкретного типу речовини. Наприклад, агар найчастіше екстрагують при температурах понад 85 °C для забезпечення повного розчинення та максимальної ефективності процесу. Карагенани завдяки своєму хімічному складу можуть розчинятися як у холодній, так і в гарячій воді, що робить їх екстракцію більш гнучкою.

Для альгінату ключовим параметром є pH розчину, який слід підтримувати вище значення його pKa (між 3,4 та 4,4). Саме рівень кислотності визначає розчинність альгінату і, відповідно, ефективність його вилучення з тканин морських водоростей. Таким чином, точний контроль температури та pH є критично важливим для оптимізації процесів екстракції різних гідроколоїдів.

Екстракцію альгінату здійснюють виключно за допомогою лужної обробки. Після вилучення полісахаридів усі гідроколоїди нейтралізують, щоб усунути надлишок хімічних реагентів та розчинників. Надлишки домішок видаляють за допомогою осадження та фільтрації, залишаючи чисту сполуку. На фінальному етапі отриманий альгінат подрібнюють, сушать та очищають, готуючи продукт до комерційного використання, забезпечуючи його стабільність та придатність для промислових або харчових застосувань.

Традиційні методи обробки морських водоростей для отримання гідроколоїдів характеризуються значною витратою часу та використанням великої кількості розчинників. У зв'язку з цим активно досліджуються інноваційні технології екстракції та виробництва гідроколоїдів, які застосовуються на різних етапах обробки макроводоростей. Мета цих розробок — підвищення виходу цінних сполук, одночасне збільшення продуктивності промислових процесів та мінімізація або повна відмова від використання

органічних розчинників, що робить процеси більш стійкими та екологічно безпечними.

У загальному вигляді процес виділення полісахаридів з морських водоростей включає кілька складних і трудомістких етапів. Спершу проводиться підготовка сировини, що передбачає очищення від домішок і епіфітів, потім — попередня обробка для покращення властивостей полісахаридів. Наступним кроком є екстракція, яка може здійснюватися традиційними методами або за допомогою інноваційних технологій, спрямованих на підвищення виходу та якості продукту. Завершує процес очищення, що передбачає видалення залишків реагентів та домішок. Під час усіх цих етапів зазвичай проводять аналізи біологічної активності виділених полісахаридів, що дозволяє оцінити їхній потенціал для промислового та комерційного використання.

Підготовка морських водоростей до екстракції полісахаридів включає ретельне промивання, бажано дистильованою водою, для видалення солей та сторонніх домішок. Після цього водорості сушать або ліофілізують і подрібнюють, щоб отримати порошок із підвищеним співвідношенням поверхні до об’єму, що сприяє більш ефективній екстракції. Видалення заважаючих сполук перед екстракцією є важливим кроком для запобігання забрудненню цільового полісахариду та підвищення чистоти кінцевого продукту.

Традиційні методи екстракції полісахаридів передбачають використання гарячих водних або кислих розчинів при високих температурах протягом кількох годин. У той же час передові технології показали численні переваги порівняно з класичними методами: вони дозволяють підвищити ефективність екстракції, скоротити час процесу, зменшити витрати енергії та розчинників, а також зберегти чутливі та нестабільні біоактивні молекули, такі як поліфеноли.

Незалежно від обраного методу, параметри екстракції повинні бути оптимізовані, оскільки вони впливають на хімічну структуру полісахаридів, їхню біоактивність та потенційне промислове застосування. Збереження структурної цілісності полісахаридів є критично важливим для забезпечення необхідних

фізико-хімічних та біологічних характеристик, включно з їх гелеутворювальною здатністю та специфічною біологічною активністю.

12.6.1. Попередня обробка морських водоростей

Перед екстракцією полісахаридів корисно провести попередню обробку морських водоростей для видалення ліпідів, пігментів та низькомолекулярних сполук, що можуть заважати отриманню цільового продукту. Для цього застосовуються різні розчинники та їхні суміші з різною полярністю, які не змінюють структуру полісахаридів. Ліпіди традиційно видаляють неполярними розчинниками, такими як хлороформ, петролейний ефір або дихлорметан; пігменти — напівполярними розчинниками, наприклад ацетоном, метанолом або етанолом; а інші високо полярні молекули, такі як моносахариди, білки та мінерали, екстрагують водою.

Наприклад, перед екстракцією ламінарину з Cystoseira barbata порошок морських водоростей обробляли послідовно двічі ацетоном-метанолом (7:3) та двічі хлороформом протягом 24 годин при 30 °C із постійним перемішуванням (250 об/хв). Аналогічно, для фукоїдану застосовували суміш метанол-хлороформ-вода (4:2:1) як попередню обробку.

Однак хлороформ є токсичним і вважається надзвичайно небезпечною речовиною за законодавством США (розділ 302 Закону про планування надзвичайних ситуацій та право громади знати, 42 USC 11002). Тому для попередньої обробки запропоновані альтернативи без хлороформу. Наприклад, використовують нетоксичний і відносно недорогий петролейний ефір. Порошок Cystoseira myrica обробляли петролейним ефіром та ацетоном у апараті Сокслета перед екстракцією полісахаридів. Таку ж методику застосовували для виділення альгінату натрію з Dictyopteris membranaceae та Padina pavonica, де порошок попередньо тричі обробляли метанолом та дихлорметаном (1:1, об./об.) протягом 48 годин.

Крім ацетону, у якості попередніх розчинників також використовували 95% етанол, 80% етанол та чистий метанол. На відміну від попередніх процедур,

де не застосовували підвищених температур, для 80% етанолу вища температура є прийнятною, оскільки фукоїдан не розчиняється в етанолі. Таким чином, навіть якщо він ненавмисно потрапляє до розчинника, він випадає в осад, а під час фільтрації видаляються лише домішки, такі як пігменти та ліпіди.

Перед екстракцією полісахаридів морські водорості, які пройшли попередню обробку, додатково піддають традиційним методам сушіння, таким як вакуумна сушка або ліофілізація. Через міцні клітинні стінки морських водоростей внутрішньоклітинні молекули часто важко доступні для розчинника, тому застосовується попередня обробка для руйнування клітинних структур. Це підвищує ефективність подальшої екстракції, роблячи цільові полісахариди більш доступними.

Для руйнування клітин використовують різні методи: механічні, хімічні, термічні, ферментативні, а також передові технології, такі як ультразвукове та мікрохвильове оброблення. Ультразвукова та мікрохвильова обробка базується на енергетичних хвилях, які впливають на клітинну стінку, спричиняючи її лізис та вивільнення внутрішньоклітинних молекул. Хоча ці методи частіше застосовують у виробництві біоетанолу з водоростей, де попередня обробка спрямована на руйнування клітин та вивільнення складних вуглеводів для подальшого ферментативного перетворення на моносахариди, вони також ефективні для виділення полісахаридів.

Наприклад, для екстракції фукози та уронової кислоти з Ascophyllum nodosum застосовували ультразвукову обробку протягом 10 хвилин (20 Гц, амплітуда 20–100%, діаметр зонда 13 мм), після чого проводили просту екстракцію в орбітальному шейкері протягом 1–22 годин. Порівняно з контрольною екстракцією, попередня ультразвукова обробка значно підвищила вихід фукози та уронової кислоти, при цьому амплітуда ультразвуку виявилася найважливішим фактором, що впливає на ефективність попередньої обробки.

12.7. Нові методи екстракції

Традиційна екстракція гідроколоїдів має низку суттєвих недоліків. Вона характеризується високими витратами часу, енергії та води. Для досягнення оптимального виходу часто використовують велику кількість хімічних розчинників, деякі з яких можуть становити загрозу для здоров'я людини. Через недостатній контроль над процесом та скиданням використаних хімікатів існує ризик забруднення навколишнього середовища і потенційного впливу на здоров'я. Додатковим недоліком класичної методики є висока вартість розчинників, які застосовуються під час осадження карагенану для отримання рафінованих продуктів.

Традиційна екстракційна обробка полісахаридів морських водоростей часто призводить до утворення великої кількості небезпечних відходів. Якщо застосовувані розчинники є токсичними, необхідні додаткові етапи очищення для відповідності харчовим та фармацевтичним стандартам, що ускладнює процес і збільшує витрати. У зв'язку з цим сталий та екологічно безпечний підхід до екстракції полісахаридів стає одним із пріоритетних напрямів сучасних досліджень природних продуктів.

Одним із рішень є використання екологічно чистих розчинників, таких як іонні рідини, евтектичні розчинники, поверхнево-активні речовини або розчинники біологічного походження, що дозволяє мінімізувати негативний вплив на здоров'я людини та довкілля. Зокрема, глибокі евтектичні природні розчинники (Deep Eutectic Solvents, DES), які виготовляються з природних компонентів, пропонуються як ефективна і безпечна альтернатива органічним розчинникам. Вони мають низьку вартість, здатність розчиняти біополімери, біорозкладність, нетоксичність, регульовану полярність та можливість повторної переробки.

Глибокоевтектичні природні розчинники можна поділити на чотири основні категорії: суміші органічних солей із солями металів; суміші органічних

солей із гідратами металів; суміші органічних солей із донорами водневих зв'язків; та суміші хлоридів металів із донорами водневих зв'язків.

Практичне застосування DES вже продемонстроване у виділенні флоротанінів із бурих водоростей Fucus vesiculosus та Ascophyllum nodosum, де досягнутий вихід екстракції становив 60–72%. У дослідженні полісахаридів Sargassum horneri застосовували ультразвукову екстракцію з глибокоевтектичним розчинником, що складався з холінхлориду, 1,2-пропандіолу та води. Результати показали, що DES більш ефективно видаляє білки та $CaCO_3$ порівняно з традиційною гарячою водною екстракцією, підтверджуючи їх потенціал як альтернативного екологічного методу.

Також твердофазна екстракція фукоїдану та ламінарину з Laminaria показала високу ефективність глибокоевтектичного розчинника на основі хлориду холіну та сечовини, з виходом 95,5% для фукоїдану та 87,6% для ламінарину. Ці дані свідчать про значні переваги DES у порівнянні з традиційними методами екстракції як з точки зору екологічності, так і ефективності вилучення полісахаридів.

Для селективної екстракції к-карагінану з Kappaphycus alvarezii застосували три різні глибокоевтектичні розчинники, утворені шляхом комплексоутворення холінхлориду з сечовиною, етиленгліколем та гліцерином, а також їх гідратовані аналоги. Вихід полісахариду, отриманого за допомогою DES, порівнювали з к-карагінаном, екстрагованим традиційним методом із використанням води. Результати показали, що полісахариди, виділені з глибокоевтектичними розчинниками, мали кращі фізико-хімічні та реологічні властивості порівняно з продуктом, отриманим класично, що свідчить про підвищену якість і потенціал DES для промислової екстракції карагенану.

Серед альтернативних методів екстракції та обробки полісахаридів виділяють мікрохвильову екстракцію (MAE), ультразвукову екстракцію (UAE), екстракцію під високим тиском та ферментативну екстракцію (EAE). Деякі з цих технологій вже успішно застосовувалися для виділення біологічно активних речовин із рослинної сировини. Кожен із цих методів має свої переваги, зокрема

підвищену швидкість процесу та можливість збереження чутливих сполук, а також певні обмеження, пов'язані з витратами енергії, вартістю обладнання та масштабуванням для промислового виробництва.

12.7.1. Мікрохвильова екстракція (MAE)

Мікрохвильова екстракція (MAE) базується на використанні електромагнітного випромінювання з частотами від 0,3 до 300 ГГц та довжинами хвиль від 1 мм до 1 м для обробки біомаси. Під дією мікрохвиль клітинні стінки руйнуються через рівномірне нагрівання матриці, що призводить до підвищення тиску внаслідок випаровування вологи. Це збільшує пористість тканин, покращує проникнення розчинника та сприяє вивільненню внутрішньоклітинних сполук.

Мікрохвильові системи можуть працювати як у відкритих, так і у закритих посудинах при атмосферному тиску або під високим тиском, що дозволяє досягати точок кипіння розчинника при нижчих температурах. Основні параметри MAE включають частоту та потужність мікрохвиль, час і тиск екстракції, співвідношення тверда/рідка речовина, властивості розчинника, характеристики матриці, температуру та кількість циклів екстракції. Оптимізація цих параметрів забезпечує численні переваги: покращений масообмін, локальне та вибіркове нагрівання, деградацію тканин, скорочення часу та енергоспоживання, зменшене використання розчинників, підвищену швидкість екстракції та високу якість продукту.

Метод MAE застосовується для обробки як свіжої біомаси, так і сушених зразків, і використовується для виділення різних біоактивних сполук, включаючи полісахариди та фенольні сполуки з морських водоростей. Наприклад, MAE підвищила вихід поліфенолів з Carpophyllum flexuosum на 70% порівняно з традиційною екстракцією та збільшила вихід карагенану з Solieria chordalis на 20%.

Недоліком методу є складність екстракції термолабільних сполук (жирних кислот, пігментів, білків) через швидке підвищення температури. Існують два

типи систем МАЕ: відкрита та закрита. Відкрита система менш дорога, автоматизована та працює під тиском повітря, що знижує ризик займання, але має обмежену точність і не дозволяє одночасно обробляти кілька зразків. Закрита система працює під високим тиском і температурою, що підвищує ризик вибуху, але забезпечує більшу ефективність екстракції.

Завдяки МАЕ вдалося екстрагувати фукоїдан з Fucus vesiculosus, оцінити загальний вихід цукру та вміст SO_3, а також отримати флоротаніни з тієї ж біомаси. Метод характеризується коротким часом екстракції, застосуванням неагресивних розчинників, зниженням витрат і екологічною безпекою, що робить його перспективним для промислового використання.

Метод мікрохвильової екстракції (МАЕ) також застосовували для виділення карагенану з Solieria chordalis (Rhodophyta) з метою дослідження виходу полісахариду, його фізико-хімічних властивостей та противірусної активності. Результати показали, що, незважаючи на скорочений час екстракції та економію енергії, суттєвих відмінностей у виході карагенану між МАЕ та традиційною лужною екстракцією не спостерігалося. Це свідчить про те, що МАЕ може бути ефективною альтернативою класичним методам, особливо з точки зору енергоефективності та збереження якості продукту, навіть якщо кількісно вихід полісахариду не відрізняється.

Сульфатовані полісахариди, зокрема фукоїдан, із бурих водоростей Ascophyllum nodosum були екстраговані методом мікрохвильової екстракції (МАЕ). Було досліджено вплив різних умов екстракції, зокрема температури (90–150 °C) та часу (5–30 хвилин), на вихід полісахариду. Найвищий вихід фукоїдану — 16,08 % — був досягнутий при 120 °C протягом 15 хв, що демонструє високу ефективність МАЕ для вилучення сульфатованих полісахаридів із морських водоростей і підтверджує її потенціал як швидкої та економічно вигідної технології.

12.7.2. Ультразвукова екстракція (UAE)

Ультразвукова технологія базується на використанні звукових хвиль з частотою вище діапазону чутності людини (>20 кГц) та нижче мікрохвильових частот (≤10 МГц), які поширюються у зразках як хвилі стиснення та розрідження. За інтенсивністю такі технології поділяють на низькоінтенсивні (<1 Вт/см²) та високоінтенсивні (10–1000 Вт/см²), причому останні найчастіше застосовуються для виділення поживних та біоактивних сполук.

Під час проходження ультразвукових хвиль через розчинник виникає акустична кавітація, що спричинює формування кавітаційних бульбашок і збільшує площу контакту між рідкою та твердою фазами. Це покращує проникнення розчинника в тканини та прискорює дифузію розчинених сполук. У твердо-рідинних суспензіях бульбашки утворюють асиметричні структури, які захоплюють пару розчинника, а їх імплозія створює механічну енергію через мікротурбулентність. Цей процес руйнує клітинні стінки морських водоростей, що значно підвищує ефективність екстракції біоактивних компонентів.

На процес ультразвукової екстракції (UAE) впливають численні змінні, зокрема тиск, частота та інтенсивність хвиль, температура, в'язкість розчинника та поверхневий натяг. Використання ультразвукових хвиль підвищує вихід екстракції та одночасно скорочує час обробки. Порівняно з традиційними методами, UAE є ефективною, екологічно чистою, простою у використанні та економічно вигідною технологією.

У харчовій промисловості UAE застосовують для виділення широкого спектру біологічно активних сполук завдяки низьким витратам на обслуговування обладнання та його компактним розмірам, що дозволяє зменшити займаний простір та масштабувати процес до промислового рівня. Незважаючи на те, що кількість досліджень із застосуванням UAE для морських водоростей обмежена, результати є надзвичайно обнадійливими. Так, порівняно з традиційними методами, вихід та чистота карагенану виявилися вищими при

використанні UAE, а ламінарин, екстрагований цим методом, демонстрував підвищений вихід та посилені антиоксидантні властивості.

Основним недоліком UAE є високі капітальні витрати на обладнання та енергію, що обмежує її широке промислове застосування. Однак використання ультразвукової екстракції як самостійного методу або в комбінації з іншими технологіями може стати перспективним інноваційним підходом для промислової екстракції полісахаридів із морських водоростей.

Ультразвукова екстракція (UAE) застосовувалася для виділення альгінатів із бурих водоростей Sargassum binderi та Turbinaria ornate, а також карагенану з червоних водоростей Kappaphycus alvarezii та Eucheuma denticulatum. Вихід екстрагованих полісахаридів досягав 55% від сухої ваги біомаси та був отриманий за короткий час (15–30 хв), порівняно з 27% при традиційній екстракції, що тривала близько 2 годин. При цьому ультразвукова обробка не впливала на хімічну структуру та молярний розподіл альгінатів і карагенану, одночасно скорочуючи час процесу.

UAE також ефективно застосовувався для виділення біоактивних сполук із Ascophyllum nodosum, зокрема загального вмісту фенолів, фукози та уронової кислоти, та для отримання альгінатів із тієї ж біомаси. У дослідженнях вплив змінних параметрів UAE на Padina australis включав температуру (40–60 °C), час екстракції (50–80 хв), концентрацію етанолу (0–60% об./об.) та співвідношення зразка до розчинника (1–5 г/100 мл). Ці параметри значною мірою впливали на вихід загального вмісту фенолів, активність поглинання радикалів DPPH (DRSA) та антиоксидантну здатність, що відновлює залізо.

Оптимальними умовами для UAE були визначені: температура 60 °C, час обробки 60 хв, концентрація розчинника 60% водного етанолу та співвідношення зразка до розчинника 1 г/100 мл. Завдяки таким умовам ультразвукова екстракція виявилася ефективним методом, що дозволяє економити час і розчинники та отримувати високоякісні полісахариди та біоактивні сполуки.

12.7.3. Технологія високого тиску

Метод екстракції під тиском (Pressure-Solvent Extraction, PSE) передбачає підтримання розчинника в рідкому стані за допомогою тиску в діапазоні 3,5–20 МПа, що дозволяє використовувати температури, значно вищі за його нормальну точку кипіння. Підвищений тиск покращує проникнення розчинника в матрицю зразка, знижує його в'язкість і поверхневий натяг, а також підвищує проникність клітинних стінок. У випадку використання води як розчинника PSE здійснюють при температурах 50–300 °C та тиску 35–200 бар, що перевищує її нормальну точку кипіння, але залишається нижче критичної точки, дозволяючи воді залишатися рідкою.

Підвищення температури зменшує густину, в'язкість і поверхневий натяг розчинника, що сприяє швидшому масообміну та підвищенню виходу екстракції. Поєднання високого тиску та температури покращує десорбцію цільових сполук, підвищує розчинність і дифузію розчинника, що позитивно впливає на кінетику процесу. Основними перевагами PSE є висока ефективність екстракції, зменшене споживання розчинника, скорочений час обробки та безпека процесу.

Однак екстракція лабільних сполук повинна проводитися короткочасно, оскільки вони можуть руйнуватися під дією високих температур і тиску. Незважаючи на значний потенціал PSE, публікацій щодо її застосування для екстракції морських водоростей обмежена. Серед екстрагованих сполук найбільш перспективними є фенольні сполуки, полісахариди та амінокислоти, які знаходять широке застосування у харчовій, фармацевтичній та косметичній промисловості.

Фенольні сполуки з бурих водоростей Fucus vesiculosus були екстраговані методом рідинної екстракції під тиском (Pressurized Liquid Extraction, PLE) за оптимальних умов: температура 137,18 °C, 58,65% (об./об.) етанолу у воді та час екстракції 4,68 хв. Вихід екстракту склав 31,16% від сухої речовини. Загальний вміст фенолів та антирадикальна активність (DPPH) отриманого екстракту незначно відрізнялися від показників, досягнутих традиційною екстракцією

розчинником. Це демонструє переваги PLE, насамперед значно скорочений час обробки та менше використання розчинника, без втрати якості екстрагованих сполук.

Для отримання противірусних сполук з їстівної морської водорості Himanthalia elongata застосували рідинну екстракцію під тиском (Pressurized Liquid Extraction, PLE). Екстракти PLE, використовуючи гексан, етанол та воду як розчинники, оцінювали на противірусну активність проти вірусу простого герпесу типу 1 (HSV-1) на різних стадіях інфекції. Результати показали, що PLE є ефективним і придатним методом для отримання противірусних сполук з Himanthalia elongata.

Крім того, цей метод був успішно застосований для екстракції карагенану з червоних водоростей Kappaphycus alvarezii, що підтверджує ефективність PLE для виділення полісахаридів та біологічно активних сполук із морських водоростей.

12.7.4. Ензимно-асистована екстракція (EAE)

Ензимна екстракція передбачає гідроліз біомаси морських водоростей шляхом введення специфічних ферментів, які руйнують полісахаридний каркас клітинних стінок. Найчастіше використовують такі ферменти, як целюлаза, пектиназа, глюкозидаза, ксиланаза та глюконаза, що дозволяє ефективніше звільняти внутрішньоклітинні компоненти, які утримуються водневими або гідрофобними взаємодіями.

Для забезпечення максимальної ефективності екстракції важливе врахування низки параметрів, зокрема: температури, pH, співвідношення субстрату до ферменту, типу та обсягу розчинника, а також інтенсивності перемішування. Оптимізація цих факторів дозволяє підвищити вихід цільових сполук і зберегти їхню біологічну активність.

Ензимна екстракція (EAE) має численні переваги, серед яких: низька вартість; перетворення молекул, які зазвичай нерозчинні у воді, на водорозчинні форми; підвищена ефективність та специфічність у виділенні цільових сполук;

можливість масштабування процесу; відсутність потреби у використанні небезпечних хімічних речовин або органічних розчинників; а також скорочений час екстракції.

На сьогодні проведено обмежену кількість досліджень щодо застосування ЕАЕ для морських водоростей. Так, альгінати та інші полісахариди з Cystoseira trinodis були отримані за допомогою ферментативної попередньої обробки. Порівняно з традиційними методами, ферментативна обробка підвищувала загальну антиоксидантну активність екстрактів, хоча вихід альгінатів та фукоїдану суттєво не відрізнявся.

Дослідження показали, що екстракти ЕАЕ з Sargassum muticum, Osmundea pinnatifida та Codium tomentosum характеризувалися високим вмістом азоту та загальних фенолів, значними рівнями сульфатованих полісахаридів та високою пребіотичною активністю. Зокрема, екстракти Codium tomentosum та Osmundea pinnatifida демонстрували інгібуючу активність проти β-глюкозидази на рівні 38–49%.

ЕАЕ також успішно застосовували для отримання карагенану з високим виходом та відмінними гелеутворюючими властивостями. Крім того, метод зберігає структурну цілісність цільових сполук, таких як білки, ульвани, ліпіди та фукоїдани, забезпечуючи високу біоактивність продуктів, що робить їх придатними для застосування в косметичному, нутрицевтичному та фармацевтичному секторах.

Ензимну екстракцію (ЕАЕ) застосовували для виділення біоактивних сполук із семи видів бурих морських водоростей, зібраних на узбережжі Кувейту, з подальшою характеристикою отриманих екстрактів. Серед досліджених видів ферментативні екстракти з Sargassum boveanum, Sargassum angustifolium та Feldmannia irregularis продемонстрували виражену антиоксидантну активність у різних тест-системах.

Хоча загальна антимікробна дія ферментативних екстрактів була відносно низькою, використання ферментного препарату Flavourzyme сприяло отриманню більшої кількості екстрактів із помітною активністю проти харчових

патогенів. Це свідчить про те, що ферментативна екстракція може бути ефективним інструментом для цілеспрямованого отримання екстрактів морських водоростей із заданими біологічними властивостями.

Крім того, EAE застосовували для обробки Ulva armoricana (Ulvales, Ulvophyceae). Отримані екстракти виявляли противірусну та антиоксидантну активність, що підтверджує доцільність використання ферментативної екстракції як перспективного методу для цього виду зеленої водорості.

Білкові екстракти з бурої водорості Macrocystis pyrifera та червоної водорості Chondracanthus chamissoi були отримані із застосуванням ферментативної екстракції з використанням целюлази з метою підвищення виходу білка. Порівняння результатів ферментативного та неферментативного способів показало, що руйнування вуглеводної матриці клітинної стінки, чутливої до дії целюлази, сприяє суттєвому збільшенню вмісту білка в екстрактах.

Вихід білкової фракції становив 74,6% для Macrocystis pyrifera (тривалість обробки 18 годин, співвідношення фермент : біомаса — 1:10) та 36,1% для Chondracanthus chamissoi (12 годин, співвідношення 1:10). Обидва отримані білкові екстракти виявляли антиоксидантні властивості, тоді як екстракт із Macrocystis pyrifera додатково продемонстрував потенційну антигіпертензивну активність.

12.7.5. Сталий видобуток полісахаридів морських водоростей з використанням іонних розчинників

Хоча вміст полісахаридів у рослинах і морських водоростях є доволі значним (15–60%), ефективність їх вилучення з біоресурсів залишається ключовим чинником комерційної доцільності полісахаридоорієнтованих галузей. Традиційні методи екстракції полісахаридів з морських водоростей передбачають багатостадійні процеси, що супроводжуються утворенням значних об’ємів стічних вод. Для руйнування клітинних стінок зазвичай

застосовують надлишкові кількості лугів і кислот, а невикористані реагенти в кінці процесу переходять у відходи.

Один із найбільш економічно важливих полісахаридів морських водоростей — агар — традиційно отримують з агарофітів шляхом попередньої лужної обробки, подальшого автоклавування та багаторазових циклів заморожування-розморожування водного екстракту для виділення продукту. Подальше очищення включає обробку розчинниками, хімічні методи та/або хроматографію для видалення залишкових домішок. З одержаного агару додатково виділяють агарозу, зазвичай із застосуванням хроматографічних методів. Тривалість, багатостадійність і висока вартість інфраструктури роблять ці процеси малопривабливими для невеликих виробництв.

У зв'язку з цим перспективним напрямом є скорочення кількості технологічних операцій, зменшення використання агресивних реагентів або заміна їх на відновлювані розчинники. Завдяки високій здатності до розчинення, екстракції та повторного використання, іонні рідини (ІР) розглядаються як ефективні альтернативні середовища. Зокрема, імідазолій- та амонійвмісні ІР продемонстрували придатність для екстракції агару з червоної водорості Gracilaria dura. Обробка біомаси 1-етил-3-метилімідазолію ацетатом у поєднанні з мікрохвильовим випромінюванням забезпечувала ефективне вилучення, а агарозу виділяли осадженням у метанолі.

Подальший розвиток сталих технологій пов'язаний зі зменшенням кількості стадій та реагентів. Селективна коагуляція цільової сполуки в одностадійному процесі є більш раціональним підходом до виділення біополімерів зі складних природних матриць. Встановлено, що біологічна іонна рідина — лаурат холіну — має селективну спорідненість до агарози в гарячих екстрактах морських водоростей, що забезпечує її вибіркове осадження. Цей метод дозволяє отримувати агарозу без стадії попереднього очищення агару та без енергоємних циклів заморожування-розморожування.

Іонна рідина може бути регенерована та повторно використана в наступних циклах, а ізопропіловий спирт, застосований для промивання кінцевого

продукту, відновлюється дистиляцією та також використовується повторно. Таким чином, зменшення кількості операційних етапів скорочує тривалість процесу й енергоспоживання, а рециклінг розчинників знижує загальне хімічне навантаження, що робить технологію більш екологічно та економічно сталою.

12.7.6. Модифікація полісахаридів морських водоростей в іонному розчиннику

Іонні рідини (IP) розглядаються як перспективні середовища для проведення хімічних перетворень. Вони характеризуються високою здатністю розчиняти полісахариди, зокрема целюлозу, крохмаль та інші біополімери, що забезпечує формування гомогенних реакційних систем, придатних для хімічної дериватизації. У численних реакціях модифікації полісахаридів особливо ефективними є іонні рідини на основі імідазолію, оскільки вони демонструють хімічну інертність щодо багатьох органічних реакцій.

За гомогенних умов у середовищі IP успішно здійснюються такі перетворення полісахаридів, як ацетилювання, карбоксиметилювання, естерифікація, етерифікація, тозилювання, а також регіоселективне ферментативне ацилювання. Таким чином, іонні рідини функціонують як ефективні розчинникові системи для контрольованої модифікації структури природних полімерів.

Додатковими перевагами IP як реакційних середовищ є низький тиск пари, висока термічна стабільність, висока температура кипіння та можливість регенерації й повторного використання. Ці властивості сприяють підвищенню безпеки процесів і зменшенню екологічного навантаження.

Зокрема, ацетилювання та тозилювання целюлози в 1-аліл-3-метилімідазолій хлориді підтверджують ефективність IP для хімічної модифікації природних полімерів. Аналогічно, карбоксиметилювання та естерифікація целюлози успішно проводилися в 1-бутил-3-метилімідазолій хлориді ([C_4mim]Cl). Також описано регіоселективне ферментативне ацилювання незахищених моносахаридів у середовищі іонних рідин.

12.8. Традиційні методи екстракції проти альтернативних методів екстракції

Традиційні методи екстракції зазвичай потребують підвищених температур і є трудомісткими, що може призводити до пошкодження біомолекул та втрати їх функціональних властивостей. Натомість застосування сучасних екстракційних технологій продемонструвало суттєві переваги, зокрема скорочення часу процесу та зниження температур екстракції. Зокрема, для ультразвукової екстракції (UAE) порівняно з мацерацією було зафіксовано значне зменшення енергоспоживання (0,2 кВт·год проти 6 кВт·год) та зниження викидів CO_2 (200 г проти 3600 г CO_2 на 100 г екстрагованої сухої речовини). Таким чином, ці методи відповідають принципам «зеленої» екстракції. Крім того, властивості отриманих сполук часто залишаються оптимальними.

Разом із тим дослідження виявили певні обмеження новітніх екстракційних підходів, пов’язані з аспектами безпеки (високий рівень шуму або тиску) та можливою деградацією молекул за інтенсивних умов обробки (наприклад, потужний ультразвук може спричиняти деполімеризацію гідроколоїдів). Для подолання цих недоліків запропоновано комбінування різних методів екстракції.

Більшість сучасних технологій уже можуть бути масштабовані до промислового рівня або застосовуються на промислових і напівпромислових установках. Серед їхніх переваг — можливість використання води як розчинника при збереженні високого виходу цільових сполук. Проте твердження щодо низького енергоспоживання нових технологій потребують підтвердження за допомогою повноцінних методик оцінки життєвого циклу (LCA), які враховують вихід продуктів, споживання енергії та ресурсів у конкретних умовах застосування.

Крім того, залежно від параметрів процесу, інноваційні методи екстракції можуть викликати зміни конформації та структури молекул, що потенційно впливає на їх функціональні властивості. Незважаючи на це, впровадження нових технологій, особливо у комбінованих схемах, демонструє значний

потенціал для підвищення виходу та ефективності екстракції при одночасному скороченні тривалості обробки. Подальші виклики пов'язані з масштабуванням лабораторних розробок до рівня комерційного виробництва.

Екстракція полісахаридів та біоактивних сполук з морських водоростей є складним багатоступеневим процесом, що включає підготовку сировини, попередню обробку, руйнування клітин, власне екстракцію та очищення цільових сполук. Традиційні методи, які базуються на високих температурах і використанні кислотно-лужних розчинів, хоча й ефективні, є трудомісткими, енергоємними та потребують значної кількості хімічних реагентів, що призводить до утворення великої кількості стічних вод і негативно впливає на навколишнє середовище. Крім того, такі методи можуть спричиняти часткову деградацію молекул та втрату їхніх біологічних функцій.

Сучасні інноваційні технології, включаючи ультразвукову (UAE), мікрохвильову (MAE), рідинну екстракцію під тиском (PLE/PSE), ферментативну (EAE) та використання глибокоевтектичних і іонних рідин, демонструють значні переваги. Вони дозволяють збільшити вихід полісахаридів і фенольних сполук, скоротити час і енергоспоживання, зменшити використання токсичних або дорогих розчинників і забезпечують збереження структурної цілісності та біологічної активності цільових молекул. Комбінування таких методів і застосування сталих, перероблюваних розчинників дозволяє реалізувати принципи "зелених технологій", що сприяє сталому розвитку біотехнологічної галузі.

Разом із тим, інтенсивні умови обробки, високі температури або ультразвук можуть призводити до часткової деполімеризації або змін конформації молекул, що підкреслює необхідність оптимізації параметрів екстракції для кожного виду морських водоростей і цільових сполук. Особливо перспективними є методи селективного осадження та коагуляції з використанням іонних рідин або біологічно активних евтектичних розчинників, що дозволяє мінімізувати кількість операційних етапів і скоротити енергетичні витрати.

Таким чином, сучасні підходи до екстракції та обробки морських водоростей відкривають нові можливості для промислового виробництва біоактивних полісахаридів та інших сполук із високою ефективністю, економічністю та екологічною безпекою. Основним майбутнім викликом є масштабування цих методів до комерційного рівня з одночасним збереженням високої якості продуктів, стабільної біоактивності та мінімізації витрат ресурсів.

Питання для самоконтролю

1. Які основні біологічні сполуки містяться в морських водоростях?
2. Яким чином класифікують полісахариди, отримані з морських водоростей?
3. З яких видів морських водоростей можна отримати полісахариди?
4. Яку роль відіграють морські водорості у забезпеченні продовольчої безпеки?
5. Як споживання морських водоростей впливає на здоров'я людини?
6. За рахунок яких характеристик морські водорості впливають на функціонування екосистем?
7. Чи можуть морські водорості служити джерелом біоенергії?
8. На чому базуються традиційні методи обробки морських водоростей?
9. Які попередні технологічні етапи слід виконати перед основною екстракцією з морських водоростей?
10. З якою метою застосовують мікрохвильову екстракцію морських водоростей?
11. Що являє собою ультразвукова екстракція при отриманні полісахаридів з морських водоростей?
12. У яких випадках проводять екстракцію полісахаридів за допомогою розчинника під високим тиском?
13. Що таке ферментативна (ензимно-асистована) екстракція і як її використовують для вилучення полісахаридів з морських водоростей?

14. Яким чином іонні рідини впливають на ефективність видобування полісахаридів з морських водоростей?

15. Як альтернативні технології екстракції підвищують ефективність вилучення полісахаридів з морських водоростей?

Рекомендована навчальна література

1. Бобрівник Л. Д., Логвін В. М. Хімічні процеси виробництв сахаридів : монографія. Київ : Експрес-Поліграф, 2014. 268 с.

2. Технологічні комплекси харчових виробництв : навч. посіб. / В. І. Теличкун, О. М. Гавва, Ю. С. Теличкун та ін. Київ : Сталь, 2017. 456 с.

3. Процеси і апарати. Механічні процеси і технології надвисокого тиску : підручник / В. С. Бойко, К. О. Самойчук, В. Г. Тарасенко та ін. Мелітополь : Люкс, 2019. 273 с.

4. Біохімія : навч. посіб. для здобувачів першого (бакалавр.) рівня вищ. освіти / І. А. Іонов, О. О. Дехтярьова, В. Б. Москальов та ін. ; Комун. закл. «Харків. гуманіт.-пед. акад.» Харків. обл. ради. Харків, 2024. 315 с. URL: https://dspace.hnpu.edu.ua/handle/123456789/16247

5. Чигвінцева О. П. Харчова хімія : навч. посіб. / О. П. Чигвінцева, А. В. Токар. Дніпропетровськ : Принтхаус Римм, 2014. 256 с. URL: https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/7445

Розділ 13. КАМЕДІ, ОТРИМАНІ З РОСЛИННИХ ТА МІКРОБНИХ ДЖЕРЕЛ

13.1. Їстівні камеді, класифікація

Інноваційні технології отримання камедей із рослинних та мікробних джерел включають генетичну модифікацію мікроорганізмів для збільшення їхньої популяції. Також використовують нові живильні середовища, що включають побічні продукти життєдіяльності, для ефективного виробництва мікробної камеді. Для обробки камеді застосовують нетермічні технології, наприклад ультразвук, що дозволяє зберегти її харчові властивості.

У випадку рослинних камедей основні досягнення зосереджені на модифікації молекулярної структури для покращення функціональних властивостей. Крім того, проводиться екстракція біоактивних сполук, що дозволяє використовувати рослинні камеді у харчовій промисловості, доставці лікарських засобів та тканинній інженерії.

Їстівні камеді – це природні полісахаридні ексудати рослин, що виділяються зі стовбурів, кори або коренів дерев та кущів. Вони широко застосовуються в харчовій промисловості як загусники, стабілізатори, емульгатори, гелеутворювачі та замінники жиру. Хімічний склад і фізико-хімічні властивості камедей залежать від виду рослини, географічних умов, сезону збору та методу обробки.

За походженням рослин камеді поділяються на трав'яні та деревні/кущові. Трав'яні ексудати виділяються з трав'янистих рослин, тоді як деревні та кущові отримують із дерев і кущів, таких як трагакант (Astragalus), гуміарабік (акація), камедь гатті (Anogeissus lactifolia) та камедь кешью (Anacardium occidentale).

За хімічним складом більшість їстівних камедей містить розгалужені або лінійні полісахариди, зокрема ксилозу, арабінозу, галактозу, рамнозу та фруктозу. Окрім полісахаридів, камеді можуть містити неорганічні солі, білки та лігніни, що впливають на їх колір і фізико-хімічні властивості.

За функціональними властивостями камеді виконують різні ролі: загусники, емульгатори, гелеутворювачі або стабілізатори текстури. Наприклад, трагакант і гуміарабік добре працюють як загусники та емульгатори, а камедь кешью та камедь гатті ефективні як гелеутворювачі. Деякі камеді використовують як замінники жиру в низькокалорійних та функціональних харчових продуктах.

За розчинністю камеді поділяються на легкорозчинні та повільнорозчинні. Легкорозчинні, такі як гуміарабік і камедь гатті, розчиняються навіть у холодній воді, утворюючи колоїдні розчини. Повільнорозчинні, як трагакант, потребують нагрівання або тривалого перемішування для формування в'язкого розчину.

Їстівні камеді — це водорозчинні полімери, що переважно складаються з вуглеводів і білків, які здатні загущувати харчові системи або утворювати гелі.

Їх також називають ексудатами, оскільки вони збираються з різних частин дерев і рослин, таких як стовбури та гілки, а також можуть виділятися клітинами тварин, мікробами або водоростями, включно з морськими водоростями.

У харчовій промисловості застосування їстівних камедей зростає через їх здатність формувати каркас харчових систем і покращувати сенсорні властивості продуктів. Наприклад, крохмаль додають у супи та соуси для регулювання в'язкості шляхом загущення; альгінат використовується у майонезі для стабілізації емульсії, а пектин широко застосовується у виробництві джемів і желе завдяки здатності утворювати гелі з бажаною текстурою.

Крім харчового застосування, їстівні камеді мають медичне значення завдяки протираковим, протизапальним, антиоксидантним і імуномодулюючим властивостям. Наприклад, камедь акації демонструє антигіпертензивну активність, перешкоджаючи різким підвищенням артеріального тиску; конжаковий глюкоманан має пребіотичну активність, що підтримує здоров'я кишечника, а гуарова камедь завдяки високому вмісту клітковини забезпечує відчуття ситості та допомагає зменшити надмірне споживання їжі.

Конжаковий глюкоманнан — це водорозчинна клітковина, яку добувають із бульб рослини конжак. Він використовується як харчова добавка завдяки здатності вбирати воду, що сприяє відчуттю ситості, покращує травлення та допомагає нормалізувати рівень холестерину в організмі. Крім харчового застосування, конжаковий глюкоманнан використовується в косметичних продуктах як зволожуючий і тонізуючий компонент, що підвищує еластичність та м'якість шкіри.

Їстівні камеді також активно досліджуються у сфері упаковки харчових продуктів, зокрема для створення їстівних плівок і покриттів. Вони виконують численні функції, що забезпечують захист і стабільність широкого асортименту продуктів.

Камеді класифікують на чотири основні категорії залежно від джерела: рослинні, тваринні, мікробні та з морських водоростей. Їх фізичні властивості, хімічний склад, харчовий профіль та функціональні характеристики значно відрізняються в залежності від походження.

Хоча класичними функціями їстівних камедей є стабілізація, загущення та утворення гелів, кожна камедь має специфічні переваги при використанні в харчових системах. Серед інших функцій:

- ✓ заміна жиру в м'ясних та молочних продуктах;
- ✓ використання як покриття у кондитерських виробах та смажених стравах;
- ✓ інкапсуляція біоактивних сполук для захисту від агресивного середовища;
- ✓ емульгування у молочних продуктах, таких як морозиво, йогурт і масло;
- ✓ освітлення напоїв, що утворюють каламут;
- ✓ пребіотична дія у функціональних продуктах;
- ✓ піноутворення у хлібобулочних і аерованих кондитерських виробах;
- ✓ доставка ліків із контрольованим вивільненням у таблетках та капсулах.

Характеристики камедей, такі як наявні заряди, визначають їх розчинність у розчиннику та здатність взаємодіяти з молекулами води, посилюючи міжмолекулярні зв'язки. Взаємодія між полімерними ланцюгами камеді та розчинником відбувається через нековалентні фізичні зв'язки: водневі, гідрофобні та зшивальні. Безперервна агрегація таких зв'язків спершу підвищує

в’язкість розчину, а потім формує тривимірну (3D) матрицю, яка є основою для гелів та плівок.

Незважаючи на численні переваги їстівних камедей, існують певні проблеми, які необхідно вирішити для розширення їх комерційного використання. Оскільки камеді походять із природних джерел, їх хімічний склад може варіюватися, що вимагає впровадження стандартів якості та стабільності.

Фізичні та хімічні характеристики камедей впливають на зовнішній вигляд, смак та загальне сприйняття кінцевого продукту, що потребує додаткових досліджень для оптимізації їх застосування у харчовій промисловості.

Їстівні камеді, отримані з природних джерел, визнані безпечними для споживання (GRAS) і не чинять шкідливого впливу на здоров’я. Водночас, наразі відсутнє законодавче регулювання щодо максимально допустимого вмісту камедей у харчових продуктах.

Нещодавні успішні застосування камедей включають використання їх у веганських продуктах для створення текстури та відчуття у роті, подібних до оригінальних продуктів, а також як покриття смаженої їжі для зменшення поглинання олії.

Дослідники продовжують шукати нові способи використання їстівних камедей з урахуванням змін у споживчих перевагах та сучасних ринкових тенденціях.

Попередні дослідження літератури пропонують загальну класифікацію та приклади застосування їстівних камедей. Основною метою цього розділу є об’єднання та детальний огляд різних видів їстівних камедей, вироблених із зазначених джерел, які були предметом досліджень останнім часом, а також опис ефективного способу їх використання.

Особлива увага приділяється проблемам, з якими стикаються промисловці та науковці під час комерційного впровадження їстівних камедей, а також питанням безпеки та регулювання у різних харчових системах.

Додатково розглядається практичне застосування їстівних камедей у виробництві нових продуктів у численних харчових галузях, таких як молочна промисловість, виробництво напоїв, хлібопекарська та кондитерська промисловість.

Камеді мають різноманітні фізичні характеристики та хімічний склад, які залежать від джерела їх видобутку. Їхні властивості визначають широке застосування в харчовій промисловості та інших галузях.

Їстівні камеді можна загалом класифікувати на дві великі групи: природного походження та синтетичного походження.

Натуральні камеді, у свою чергу, поділяються за джерелом походження на чотири категорії: рослинного походження, тваринного походження, камеді з морських водоростей та камеді, отримані шляхом мікробної ферментації.

Їстівні камеді рослинного походження додатково класифікують за технологією отримання на ексудатні камеді, насіннєві камеді та бульбоподібні камеді. Кожен із цих класів детально описується з прикладами, що демонструють їхні функціональні та технологічні властивості.

Ексудація — це природний захисний механізм дерев у стресових умовах.

Ексудати камеді представляють собою клейку рідину, яка виділяється, коли епідерміс кори пошкоджується проколом або надрізом. Після виділення рідина висихає та твердне, перетворюючись на аморфну, склоподібну або тверду камедь. Така камедь допомагає обмежити розвиток інфекцій та запобігти надмірній втраті вологи.

Щоб підвищити врожай камеді, дерева навмисно піддають обрізкам або проколам. Прикладами камедей, отриманих таким методом, є гуміарабік, камедь гатті, камедь кешью та трагакант.

> **Трагакант** – це камедь, що виділяється з тріщин або надрізів на стовбурах і коренях різних видів кущів роду Astragalus. Вона головним чином складається зі складного вуглеводу – бассорину. У воді сильно набухає, але розчиняється дуже повільно, утворюючи надзвичайно в’язкі розчини навіть при невеликих концентраціях.

Гуміарабік є ексудатом із різних видів акації і характеризується розгалуженими молекулами β-D-галактопіранозилу та повторюваними полісахаридними одиницями, такими як арабіноза, глюкуронова кислота та рамноза.

Гуміарабік – це тверда прозора маса, що виділяється різними видами акацій і зареєстрована як харчова добавка Е414. У вигляді в'язкої рідини він на повітрі твердне. Гуміарабік легко розчиняється навіть у холодній воді, утворюючи клейкий слабокислий розчин.

Арабіноза – моносахарид, різновид пентози, тобто містить п'ять атомів вуглецю.

Глюкуронова кислота – одноосновна органічна кислота з групи уронових кислот, що присутня в рослинних і тваринних організмах. Утворюється при окисненні D-глюкози і виконує детоксикаційну функцію.

Рамноза – природний дезоксицукор, похідний від іншого пентозного цукру – рибози. Відрізняється заміною гідроксильної групи в 2-й позиції атомом водню, що призводить до втрати одного атома кисню.

Склад гумі значно варіюється залежно від джерела, географічного розташування та віку рослини. Гуміарабік застосовується як стабілізатор, загусник та гелеутворювач у харчових продуктах, а також входить до складу низки фармацевтичних препаратів, що використовуються для лікування кашлю та болю в горлі.

Камедь гатті – ексудат дерева Anogeissus lactifolia родини Combretaceae, що характеризується високими емульгуючими властивостями та здатністю зберігати стабільність готових емульсій порівняно з іншими натуральними камедями з аналогічними фракціями. Вона добре розчиняється у воді як у гарячій, так і в холодній, утворюючи колоїдні розчини. Особлива структура камеді дозволяє проводити хімічну модифікацію для надання їй необхідних властивостей. Отримана камедь має вигляд порошку без смаку та запаху, з кольором від світло-коричневого до темно-коричневого; інтенсивність темного забарвлення зростає зі збільшенням частки домішок.

Епітеліальні клітини кори дерева кешью (Anacardium occidentale) продукують горіхи кешью після фізичної або мікробної стимуляції. Додатковий процес очищення є необхідним для отримання білувато-жовтого чистого полісахариду, оскільки камедь кешью часто містить неорганічні солі, білки та лігніни. Камедь кешью використовується як гелеутворювач у виробництві джемів, желе та соків, як замінник жиру в рецептурах здорового харчування, особливо в хлібопекарській промисловості, а також як освітлювач у виробництві напоїв. Завдяки високому вмісту білка та харчових волокон, а також наявності слідових кількостей мінералів, камедь кешью є придатним інгредієнтом для створення функціональних харчових продуктів.

Трагакант, аніонний полісахарид, що добувається з видів Astragalus, характеризується складним полісахаридним складом, який включає ксилозу, арабінозу, галактозу та фруктозу. Хімічний склад камеді залежить від способу екстракції, сезону збору та географічних умов. Ця варіація впливає на співвідношення розчинних і нерозчинних сполук, що визначає загальну розчинність камеді.

Трагакант є ефективним загусником та емульгатором, який демонструє потенційну термостабільність і хорошу розчинність. Завдяки цим властивостям його широко використовують у харчових продуктах, таких як соуси, сиропи та морозиво, для запобігання небажаній кристалізації та забезпечення гладкої текстури протягом усього терміну придатності.

Їстівні камеді, отримані у вигляді ексудатів, відрізняються фізичними властивостями та хімічним складом залежно від джерела сировини, тоді як методи отримання ексудатів із різних джерел є подібними.

13.2. Камеді рослинного походження

Камеді з насіння – це полісахариди, які отримують із натурального насіння і класифікуються як гідроколоїди, що використовуються для зміцнення структурної матриці продуктів. Фізико-хімічні властивості цих камедей залежать від співвідношення галактози та манози, розподілених у насінні. До камедей,

екстрагованих із насіння, належать гуарова камедь, камедь тари, камедь ріжкового дерева та камедь льону.

Гуарова камедь – це природний полісахарид, що отримується з насіння Cyamopsis tetragonolobus. Вона представлена у вигляді жовтувато-білого порошку без запаху та смаку. Основними складовими є галактоза та маноза, розташовані у специфічному співвідношенні, що визначає її здатність утворювати в'язкі розчини навіть при низьких концентраціях.



Рис. 44. Насіння Cyamopsis tetragonolobus [43]

Гуарова камедь виконує багато функцій у харчовій промисловості. Вона є ефективним загусником, емульгатором, зв'язуючим і флокулюючим агентом. Завдяки своїм гідрофобним та біорозкладним властивостям, камедь може використовуватися не лише в рецептурах харчових продуктів, але й у виробництві пакувальних матеріалів, де вона забезпечує механічну міцність, стійкість до мікробного забруднення та продовжує термін зберігання продукту.

Фізико-хімічні властивості гуарової камеді роблять її незамінною у виробництві соусів, десертів, морозива, низькокалорійних продуктів та напоїв. Вона здатна формувати стабільні колоїдні системи, запобігає розшаруванню емульсій і сприяє покращенню текстури та однорідності готових продуктів. Крім того, гуарова камедь має потенціал для застосування у фармацевтичній

промисловості як компонент таблеток, капсул та інших лікарських форм, що потребують зв'язування або контролю вивільнення активних речовин.

Таким чином, гуарова камедь є універсальним інгредієнтом, який поєднує харчові, технологічні та біоактивні властивості, що робить її цінним компонентом для створення функціональних продуктів та інноваційних пакувальних матеріалів**.**

Камедь тара екстрагується з ендосперму насіння Caesalpinia spinosa родини Fabaceae. Вона застосовується для модифікації та стабілізації реологічних властивостей харчових продуктів, забезпечуючи контроль в'язкості, текстури та однорідності складу. Камедь тара схвалена Комісією Codex Alimentarius як нетоксична харчова добавка.



Рис. 45. Насіння Caesalpinia spinosa родини Fabaceae [44]

Завдяки високій здатності зв'язувати воду та розвиненим поверхневим властивостям, камедь тара демонструє меншу схильність до синерезису, що робить її ефективною для створення стабільних гелеподібних і суспензійних систем. Водночас вона має відносно слабкі механічні та бар'єрні властивості, що обмежує її застосування у виробництві пакувальних матеріалів.

Для подолання цих обмежень камедь тара часто комбінують з іншими натуральними камедями, такими як гуарова камедь або камедь льону. Таке поєднання дозволяє досягти синергетичного ефекту, покращуючи стабільність,

в’язкість і текстуру готового продукту, а також розширює можливості її застосування в харчовій промисловості.

Камедь ріжкового дерева – це високомолекулярний полісахарид, що отримується з бобів Ceratonia siliqua родини Fabaceae, і широко застосовується як натуральна харчова добавка. Екстракція камеді можлива лише з близько 10% бобів, що значно підвищує виробничі витрати, і саме це є основним недоліком її використання.



Рис. 46. Боби Ceratonia siliqua родини Fabaceae
і камедь ріжкового дерева [45]

У харчовій промисловості камедь ріжкового дерева застосовують для покращення покриттів фруктів, овочів, м’яса та птиці, що подовжує термін їхнього зберігання. Вона ефективно зменшує синерезис і стабілізує процеси заморожування та розморожування у рецептурах на основі крохмалю, покращуючи текстуру та однорідність продуктів.

Як і інші насіннєві камеді, камедь ріжкового дерева добувають із насіння рослин за допомогою механічної дії або хімічних процедур без створення стресового впливу на рослину. Специфіка її застосування в харчових продуктах визначається поєднанням фізико-хімічних властивостей та хімічної структури, що забезпечує контроль в’язкості, стабільності емульсій та текстури готових продуктів.

Лляна камедь отримується з зовнішнього шару лушпиння льону як побічний продукт екстракції олії. Вона має відносно низьку здатність

утримувати воду та утворювати гель, тому для ефективного застосування зазвичай комбінується з іншими гідроколоїдами.



Рис. 47. Насіння льону [46]

Незважаючи на це, лляна камедь демонструє численні функціональні властивості. Вона може використовуватися як замінник жиру, що дозволяє створювати низькокалорійні хлібобулочні та кондитерські вироби без втрати ніжності та сенсорних якостей. Крім того, лляна камедь є цінним джерелом пробіотиків, які сприяють розвитку Lactobacillus rhamnosus та забезпечують захист бактерій під час проходження через шлунково-кишковий тракт, що робить її ефективним компонентом функціонального харчування.

Покриття харчових продуктів на жировій основі лляною камеддю допомагає зменшити окислення ліпідів, запобігати прогірклому смаку та продовжує термін зберігання продукту, зберігаючи при цьому його якість і органолептичні властивості.

Деревні та кущові камеді – це природні полісахаридні ексудати, що виділяються зі стовбурів, кори або коренів дерев і кущів. Вони утворюють в'язкі розчини або гелі та широко застосовуються в харчовій промисловості як загусники, емульгатори, стабілізатори та гелеутворювачі.

Трагакант (Astragalus spp.). Трагакант – це природна камедь, яка виділяється зі стовбурів і коренів різних видів кущів Astragalus. Основу її складу становлять розгалужені полісахариди, зокрема ксилоза, арабіноза, галактоза та

фруктоза. Склад камеді може змінюватися залежно від сезону збору, географічного середовища та способу екстракції, що впливає на пропорції розчинних і нерозчинних сполук та визначає розчинність камеді.

Трагакант характеризується високою в'язкістю та здатністю утворювати стабільні емульсії, що робить його ефективним загусником та емульгатором. У харчовій промисловості його застосовують для виробництва соусів, сиропів, морозива та кондитерських виробів, де він запобігає кристалізації цукру та забезпечує гладку текстуру продукту. Трагакант також використовується у фармацевтичних продуктах як компонент таблеток та суспензій, де потрібна термостабільність і контроль в'язкості.

Гуміарабік (Acacia spp.). Гуміарабік – це природний гелеутворюючий і стабілізуючий полісахарид, зареєстрований як харчова добавка Е414. Він екстрагується з видів акацій і характеризується розгалуженою структурою β-D-галактопіранозилу з повторюваними одиницями арабінози, глюкуронової кислоти та рамнози. Завдяки цьому гуміарабік утворює колоїдні розчини навіть у холодній воді і легко розчиняється, формуючи стабільні емульсії та слабокислі клейкі розчини.

В харчовій промисловості гуміарабік використовується як загусник, стабілізатор, гелеутворювач і емульгатор. Його додають у джеми, желе, безалкогольні та молочні напої, морозиво, соуси та кондитерські вироби. Крім того, гуміарабік застосовують у фармацевтичній галузі для покращення стабільності суспензій та таблеток. Особливістю цієї камеді є її здатність до легкого формування колоїдів і утворення стійких гелів без нагрівання, що робить її технологічно зручною для виробництва.

Камедь гатті (Anogeissus lactifolia). Камедь гатті отримують з дерев родини Combretaceae. Вона відзначається високою емульгуючою здатністю та стабільністю готових емульсій у порівнянні з іншими натуральними камедями з аналогічними полісахаридними фракціями. Камедь гатті добре розчиняється у воді як у холодній, так і у гарячій, утворюючи колоїдні розчини.

Завдяки своїй структурі, камедь гатті легко піддається хімічній модифікації, що дозволяє надавати їй бажаних властивостей для конкретних технологічних потреб. В харчовій промисловості її використовують для модифікації текстури продуктів, створення стабільних емульсій, гелів та покриттів. Камедь гатті зазвичай представлена у вигляді порошку без смаку та запаху, колір якого варіюється від світло- до темно-коричневого залежно від вмісту домішок.

Камедь кешью (Anacardium occidentale). Камедь кешью видобувається з епітеліальних клітин кори дерева після фізичної або мікробної стимуляції. Після збору вона потребує очищення від білків, неорганічних солей і лігніну, щоб отримати білувато-жовтий полісахарид.

Функціональні властивості камеді кешью включають гелеутворення, загусання та заміну жиру у рецептурах. Вона використовується для виробництва джемів, желе, соків, хлібобулочних і кондитерських виробів, а також у складі функціональних продуктів харчування завдяки значному вмісту білка, харчових волокон і слідових мінералів. Камедь кешью забезпечує стабільність текстури, покращує однорідність продуктів і сприяє збереженню їх сенсорних властивостей протягом терміну зберігання.

Камедь конжаку (маннан) – це водорозчинний полісахарид, що отримується з бульб Amorphophallus konjac, рослинного виду, який походить з Китаю. Вона характеризується високою молекулярною масою і складається з повторюваних одиниць глюкози та манози. Камедь конжаку є ефективним загусником, гелеутворювачем та емульгатором і класифікована Управлінням з контролю за продуктами харчування та лікарськими засобами (FDA) як GRAS (Generally Recognized As Safe – «загальновизнана безпечна»).

Основне застосування камеді конжаку полягає у функції сполучної речовини в м’ясних та птицепродуктах, де вона покращує структуру, текстуру та утримання вологи під час приготування. Крім того, камедь додають до напоїв, таких як фруктові соки та коктейлі, для підвищення реологічних властивостей і стабілізації суспензій.

Камедь конжаку складається переважно з неперетравлюваних харчових волокон, які не гідролізуються травними ферментами, тому її можна використовувати у низькокалорійних продуктах. Наприклад, розроблено веганські м'ясні ковбаси з високим вмістом білка та харчових волокон, де камедь конжаку служить вторинним інгредієнтом. Вона запобігає втраті вологи при смаженні, покращує текстуру продукту та зберігає сенсорні властивості, такі як твердість, здатність до нарізання та приготування, наближаючи веганські ковбаси до смакових характеристик традиційних м'ясних виробів.

Бульби конжаку є особливо цінними серед рослинних камедей завдяки високому вмісту харчових волокон і здатності формувати стабільні гелі та емульсії. Вони неалергенні, що значно розширює їх практичне застосування у харчових продуктах як функціональної та їстівної камеді.

13.3. Їстівні камеді з морських водоростей

Морські водорості — це широко поширені морські рослини, які є перспективним джерелом їстівних камедей. Найвідомішими серед них є агар-агар, карагенан та альгінат. Альгінат — природний полісахарид, що добувають із бурих морських водоростей, а також його можна отримати з позаклітинного матриксу деяких бактерій, хоча останній варіант поки що не використовується комерційно. Альгінат, синтезований із морських водоростей, існує у формі альгінату натрію і є харчовою добавкою, дозволеною FDA.

Завдяки наявності вільних гідроксильних і карбоксильних груп альгінати здатні взаємодіяти з молекулами води, що визначає їхні численні функції в харчовій промисловості. Вони впливають на реологічні властивості продуктів, виступаючи як стабілізатори, загусники, емульгатори та гелеутворювачі. Альгінати застосовують у виробництві різних харчових продуктів, включно з варенням, желе, мармеладом, соусами та сиропами. Крім того, альгінати є потенційним джерелом харчових волокон, які додають до функціональних продуктів із метою зниження рівня холестерину та глюкози в крові, а також зменшення ризику серцево-судинних захворювань.

Карагенан отримують з червоних водоростей (Rhodophyceae), які виконують функції емульгатора, загусника та стабілізатора в різних галузях харчової промисловості. Він широко застосовується у молочних продуктах для стабілізації емульсій, у м'ясних виробах як зв'язуючий агент та для запобігання окисленню ліпідів, а також у дитячому харчуванні та кормі для домашніх тварин для підвищення стабільності під час зберігання.

Карагенан також використовується при виробництві їстівних плівок і покриттів для упаковки швидкопсувних продуктів. Зростаючий попит споживачів, які піклуються про здоров'я, на зручну їжу з низькою калорійністю, що максимально відповідає якості оригінальних продуктів, зробив можливим включення карагенану до рецептур йогуртів, морозива, сирів та м'ясних виробів.

Агар — це полісахарид, основними компонентами якого є агароза та агаропектин. Його добувають із червоних водоростей, зокрема Gelidium spp. та Gracilaria spp. Агар став першою харчовою добавкою, схваленою FDA, що застосовується в харчовій промисловості як стабілізатор, загусник, емульгатор та гелеутворювач.

Він використовується як освітлювач у алкогольних напоях, таких як вино, як покращувач текстури в молочних продуктах, а також як гелеутворювач у джемах, желе та десертах. Агар також має відмінні плівкоутворювальні властивості, що дозволяє застосовувати його у виробництві біологічно розкладних пакувальних матеріалів для харчових продуктів.

На відміну від наземних рослин, морські водорості містять полісахариди, здатні стабілізувати харчові системи. Їстівні камеді, отримані з морських водоростей, є дешевшими за порівнянними продуктами з інших джерел, оскільки морські водорості широко доступні і поки що недостатньо використовуються.

Альгінати — це природні полісахариди, які добувають переважно з бурих морських водоростей, таких як Laminaria, Macrocystis та Fucus. Вони є лінійними поліуронідами, що складаються з чергування залишків β-D-мануронової та α-L-гулуронової кислот.

Завдяки своїй здатності утворювати гелі при контакті з іонами кальцію альгінати широко застосовуються як загусники, гелеутворювачі та стабілізатори у харчовій промисловості. Вони використовуються у виробництві желе, джемів, мармеладу, соусів, сиропів, молочних продуктів, а також у дитячому харчуванні та кормах для домашніх тварин для підвищення стабільності продуктів під час зберігання.

Альгінати мають функціональні властивості завдяки наявності вільних гідроксильних і карбоксильних груп, які дозволяють їм взаємодіяти з молекулами води та іншими компонентами харчових систем. Це забезпечує зміну текстури продуктів, стабілізацію емульсій та поліпшення гелеутворювальних характеристик.

Крім того, альгінати є потенційним джерелом харчових волокон, що можуть сприяти зниженню рівня холестерину, регуляції рівня глюкози в крові та зменшенню ризику серцево-судинних захворювань. Альгінат натрію схвалений FDA як харчова добавка та широко застосовується в комерційних харчових продуктах.

Фукоїдани — це сульфатовані полісахариди, що містяться переважно в бурих морських водоростях, таких як Fucus, Laminaria та Undaria. Вони складаються головним чином із залишків L-фукози, з'єднаних сульфатними групами та невеликою кількістю інших моносахаридів.

Фукоїдани володіють численними біологічно активними властивостями. Вони демонструють антиоксидантну, імуномодулюючу, протизапальну та потенційно антикоагулянтну активність. Завдяки цим властивостям фукоїдани досліджуються як функціональні харчові добавки та інгредієнти для продуктів здорового харчування.

Ламінарини — це водорозчинні β-глюкани, які також отримують з бурих водоростей, таких як Laminaria spp. Вони складаються з ланцюгів β-1,3-глюкози з окремими β-1,6-розгалуженнями. Ламінарини здатні утворювати легкі гелі та розчинні волокна, що робить їх корисними для регуляції текстури харчових продуктів і підвищення вмісту дієтичних волокон у раціоні.

Поєднання фукоїданів і ламінаринів у харчових системах забезпечує не лише технологічні властивості — такі як стабілізація, загущення та утворення гелів — але й додаткові функціональні ефекти, що сприяють зміцненню здоров'я споживачів.

13.4. Їстівні камеді з мікробних джерел

Мікробні камеді — це полісахариди, які синтезуються бактеріями, дріжджами або грибками за специфічних оптимальних умов для конкретних мікроорганізмів.

Їстівні камеді мікробного походження легко масштабуються для промислового виробництва, однак їхнє виробництво потребує складного обладнання, кваліфікованої робочої сили, високоякісної сировини та точних штамів мікроорганізмів.

Мікробні камеді відзначаються високою біосумісністю з іншими їстівними камедями з різних джерел, що дозволяє їх ефективно комбінувати для синергетичного поліпшення властивостей харчових продуктів.

До основних їстівних камедей мікробного походження належать пуллулан, курдлан, склероглюкан, декстран, ксантан та геллан. Вони широко застосовуються в харчовій промисловості як загусники, стабілізатори, гелеутворювачі та емульгатори.

Пулулан — це позаклітинний гомополісахарид, який секретується різними штамами грибків роду Aureobasidium.

Пулулани використовуються у виробництві термозварювальних їстівних плівок, забезпечуючи ефективний бар'єр проти кисню та вологи без негативного впливу на сенсорні властивості упаковки. Однак їхня нездатність утворювати гелі обмежує комерційне використання, тому пулулани часто комбінують з іншими їстівними камедями для покращення фізико-хімічних властивостей продуктів.

Окрім застосування у плівках, пулулани додають до низькокалорійних продуктів, враховуючи їхню здатність надавати солодкість без додаткових

калорій, а також до рецептур пребіотичних продуктів для підтримки росту пробіотичних бактерій.

Додаткові сфери застосування включають стабілізацію емульсій, таких як майонез і соуси; регулювання реології харчових продуктів, зокрема в'язкості та текстури рідких і напівтвердих систем незалежно від pH; а також покращення зовнішнього вигляду продуктів за рахунок надання блиску заправкам для салатів.

Декстрани — це полісахаридні камеді, що утворюються в результаті ферментації цукру за участю бактерій, таких як Leuconostoc mesenteroides та Streptococcus mutans. Ці бактерії виділяють фермент декстрасахаразу, який перетворює високомолекулярні цукри на декстрани.

Завдяки високій розчинності у воді декстрани виконують роль гідроколоїдів у харчовій промисловості. Вони використовуються як загусники у вареннях, як інгібітори росту кристалів у морозиві та у продуктах з високим вмістом цукру, таких як глазур для тортів та солодкі напої.

Крім того, декстрани діють як зволожувачі, що дозволяють утримувати вологу у харчових продуктах, зокрема у випічці, перешкоджаючи накопиченню вільної води та розмноженню мікроорганізмів.

Ксантанова камедь — це позаклітинний полісахарид, який виробляється шляхом ферментації бактерій роду Xanthomonas. Вона виступає як стабілізатор та загусник і є харчовою добавкою, схваленою FDA для використання в харчовій промисловості.

Завдяки високій біорозкладності та сумісності з різними біополімерами ксантанова камедь застосовується у виробництві харчової упаковки на біооснові.

У харчових продуктах ксантанова камедь використовується як сполучна речовина в м'ясних виробах та морепродуктах, як стабілізатор у клярі, а також як загусник у фруктових соках та концентрованих напоях. Вона не впливає на сенсорні характеристики продуктів — текстуру, відчуття у роті, колір чи смак — оскільки сумісна з широким спектром харчових інгредієнтів.

Гелланова камедь — це позаклітинний полісахарид, що продукується бактеріями роду Sphingomonas. Вона утворює термостійкі гелі навіть при низьких концентраціях, завдяки чому широко використовується як загусник, стабілізатор та гелеутворювач у харчовій промисловості.

Гелланова камедь застосовується у виробництві низькокалорійних продуктів, молочних десертів, соусів та желе, забезпечуючи стабільність текстури та консистенції. Вона сумісна з іншими харчовими інгредієнтами і дозволяє контролювати в'язкість продуктів незалежно від рівня pH.

Склероглюкан — це позаклітинний полісахарид, який синтезується грибами роду Sclerotium. Його молекула складається головним чином із β-1,3-глюкозних ланцюгів із частковими β-1,6-розгалуженнями.

Склероглюкан утворює прозорі, в'язкі розчини та гелі, що робить його ефективним загусником, стабілізатором та гелеутворювачем у харчових системах. Він сумісний з різними харчовими інгредієнтами, що дозволяє контролювати текстуру, в'язкість та стабільність продуктів без впливу на сенсорні характеристики.

У харчовій промисловості склероглюкан застосовують у виробництві десертів, соусів, соєвих продуктів, напоїв та низькокалорійних продуктів. Він також використовується для стабілізації емульсій та підтримки вологи в продуктах, підвищуючи їхню термостійкість та тривалість зберігання.

Курдлан — це екзоолігосахарид, що складається з глюкозних одиниць у основній структурі, який синтезується бактеріями Agrobacterium spp. та Alcaligenes spp..

Курдлани мають здатність утворювати гелі з різною жорсткістю — від крихкої до еластичної — залежно від температури затвердіння. Утворений гель безбарвний, без запаху, не схильний до синерезису та нерозчинний у воді й деяких органічних розчинниках.

В харчовій промисловості курдлани використовуються у заморожених десертах, таких як морозиво, для підтримки стабільності емульсій, а також у

м’ясних виробах як зв’язуючий агент і покращувач текстури завдяки високій здатності утримувати вологу.

Наразі курдлани активно досліджуються як потенційне джерело пребіотиків у харчових продуктах. Мікроорганізми, що їх синтезують, культивують у контрольованих умовах для отримання їстівних камедей, які можуть використовуватися як харчові добавки. Ферментаційний метод є економічно та екологічно ефективним, оскільки потребує менше енергії та ресурсів порівняно з іншими способами отримання полісахаридів.

13.5. Їстівні камеді тваринного походження

Коли говоримять про «камеді» (гумі) у харчовій технології, зазвичай маються на увазі рослинні полісахариди (гуарова камед , агар-агар тощо). Однак у тваринному світі існують структурні аналоги, які виконують ті самі технологічні функції: загущення, гелеутворення та стабілізацію. Їстівні камеді тваринного походження (полісахаридної природи) — це гідроколоїди, отримані з тканин або покривів морських і наземних організмів, які складаються саме з полісахаридів і не містять білкової складової. На відміну від желатину, що є білком, ці речовини належать до вуглеводних біополімерів і проявляють типові властивості камедей: набухання у воді, утворення в’язких розчинів, гелів і стабілізацію дисперсних систем.

Одним із найважливіших таких полісахаридів є хітин — структурний біополімер панцирів панцерних тварин (креветок, крабів), комах і деяких грибів. Хітин має лінійну будову з повторюваних залишків N-ацетил-D-глюкозаміну та характеризується високою механічною міцністю і здатністю формувати плівки. У харчових технологіях його застосовують переважно після часткової модифікації, оскільки нативний хітин малорозчинний.

Похідним хітину є хітозан, який отримують шляхом деацетилювання. Це один із небагатьох природних катіонних полісахаридів. Хітозан добре розчиняється в слабокислих середовищах, утворює в’язкі розчини, проявляє емульгувальні, плівкоутворювальні та сорбційні властивості. У харчовій

промисловості його використовують як загущувач, стабілізатор, носій біологічно активних речовин і компонент функціональних покриттів для подовження терміну зберігання продуктів.

До полісахаридів тваринного походження також належать глікозаміноглікани — складні аніонні гетерополісахариди сполучної тканини (наприклад, гіалуронова кислота, хондроїтинсульфати). Вони мають високу гідрофільність, здатні зв'язувати значну кількість води та формувати в'язкоеластичні системи. Завдяки цьому їх застосовують у спеціалізованих харчових продуктах, нутрицевтиках і текстурувальних композиціях.

З технологічної точки зору ці полісахариди виконують функції, аналогічні рослинним камедям: регулюють реологічні властивості, стабілізують емульсії та суспензії, утримують вологу, покращують текстуру і формують захисні їстівні покриття. Водночас вони відрізняються підвищеною біологічною активністю, що відкриває можливості створення функціональних харчових продуктів із додатковими оздоровчими властивостями.

13.6. Харчова цінність їстівних камедей

Їстівні камеді — це речовини, добре відомі завдяки своїй функціональній ролі в харчових системах, зокрема як загущувачі, стабілізатори та гелеутворювачі. Водночас вони можуть позитивно впливати на харчову цінність продуктів. Їхній нутрієнтний склад змінюється залежно від джерела сировини, способу отримання та ступеня очищення гідроколоїдів. Їстівні камеді широко застосовують як інгредієнти-замінники для зниження калорійності та вмісту жиру в харчових продуктах.

Доведено, що споживання їстівних камедей сприяє зменшенню ризику серцево-судинних захворювань і цукрового діабету 2 типу завдяки регуляції функцій кишечника та стабілізації апетиту. Вони також розглядаються як потенційні пребіотики, оскільки стимулюють ріст корисної мікрофлори товстої кишки, що, своєю чергою, підтримує імунну систему. Наприклад, інулін поєднує властивості низькокалорійного підсолоджувача, замінника жиру та

пребіотичного компонента, тому активно використовується у виробництві м'ясних і птахівничих продуктів.

Завдяки фізіологічним властивостям їстівні камеді включають до складу харчових продуктів як інгредієнти, що сприяють профілактиці неінфекційних захворювань. Вони впливають на механічні, ферментативні та хімічні процеси травлення у шлунку, регулюючи відчуття голоду, частоту прийомів їжі та рівень насичення. Камеді також змінюють швидкість засвоєння поживних речовин, контролюючи тривалість перебування їжі в шлунку та інтенсивність її перетравлення.

Харчові волокна, що входять до складу камедей, підвищують в'язкість шлункового вмісту, уповільнюючи спорожнення шлунку. Їхня висока водоутримувальна здатність полегшує транзит кишкового вмісту, сприяє нормалізації дефекації та запобігає закрепам і синдрому подразненого кишечника. Полісахариди камедей також знижують всмоктування холестерину в тонкому кишечнику. Утворення в'язких полісахаридних комплексів є одним із механізмів зменшення концентрації холестерину в плазмі крові та профілактики ішемічної хвороби серця.

Крім того, їстівні камеді здатні збільшувати об'єм харчового продукту без підвищення його енергетичної цінності, забезпечуючи триваліше відчуття ситості. Такі гідроколоїди, як ксантанова камедь, карбоксиметилцелюлоза та пектин, суттєво знижують глікемічний індекс продуктів. Це пояснюється формуванням просторової (3D) матриці навколо гранул крохмалю, що уповільнює ферментативний гідроліз, травлення та всмоктування вуглеводів. Камеді також зменшують доступність крохмалю для дії α-амілази, змінюючи в'язкість системи та перебіг желатинізації.

Експериментальні дослідження показали ефективність використання їстівних камедей у технології безглютенового хліба з пониженим глікемічним індексом, де їх застосування дозволило зменшити частку швидкозасвоюваного крохмалю. Отримані зразки характеризувалися кращими харчовими та сенсорними властивостями порівняно з контрольними. Також встановлено, що

прогнозований глікемічний індекс виробів типу фірні знижувався з 51% до 47% при додаванні 1% карбоксиметилцелюлози до рецептурної суміші.

> **Фірні (Phirnee)** — це традиційний східний десерт, що являє собою ніжний рисовий пудинг, який готують із рисового борошна, молока та цукру й подають охолодженим. Зазвичай його прикрашають меленою корицею, подрібненими горіхами або ароматизують рожевою водою, що надає страві характерного східного аромату.

В іншому дослідженні оцінювали загальний вміст жиру та зниження його поглинання у смажених харчових закусках, порівнюючи контрольні зразки та зразки, покриті їстівними камедями. Результати показали, що вміст жиру в картоплі фрі з додаванням 1% пектину становив 7,3%, 1% гуарової камеді — 7,1%, 1% карбоксиметилцелюлози — 6,1%, а 1% ксантану — 4,7%, тоді як у контрольному зразку він дорівнював 14,1%. Зниження поглинання жиру відповідно становило 67,3%, 60,2%, 65,1% та 62,3%.

Хоча їстівні камеді володіють численними корисними харчовими властивостями та сприятливим впливом на здоров'я, їх слід вживати як частину збалансованого раціону і в оптимальних кількостях.

13.7. Функціональних характеристик їстівних камедей

Їстівні камеді стали невід'ємним компонентом багатьох харчових продуктів різних категорій. Їхня стабільність та функціональні властивості значною мірою залежать від параметрів продукту та умов обробки, таких як pH, температура, іонна сила та взаємодія з білками, полісахаридами, ліпідами, вологою та мікроелементами.

Основні функціональні характеристики гідроколоїдів включають емульгування, стабілізацію та загущення. Загущення забезпечується формуванням 3D-мережі полімерних ланцюгів, які зв'язують воду та створюють структуру, стійку до плинності. Емульгування полягає у зниженні поверхневої активності на межі розділу олія-вода та стабілізації дрібних частинок до та після емульгування.

Розширені властивості їстівних камедей включають модифікацію поверхні (покривні або глазуруючі агенти, гелеутворювачі), підвищення харчової цінності продукту (додавання харчових волокон, заміна жиру, низькокалорійні підсолоджувачі), бар’єрні властивості (інкапсулюючі та зв’язуючі агенти), покращення сенсорних характеристик (відчуття в роті, утримання вологи, контроль утворення кристалів), а також інші технологічні ефекти (адгезія, функція наповнювача та збивача).

Таблиця 26 – Характеристика їстівних камедей

Уніфікована назва	**Існуючі та альтернативні назви**	**Джерело**	**Е-код**	**Основні функції**	**Орієнтовна доза використання (%)**
Агар	Агар-агар, каррагінан агар, морська камедь, японський агар	Червоні морські водорості	E406	Гелеутворювач, стабілізатор, загущувач	0,1–2,0
Ксантан	Ксантанова камедь, ксантан гідроколоїд	Бактерії *Xanthomonas campestris*	E415	Загущувач, стабілізатор, емульгатор	0,05–0,5
Гуар	Гуарова камедь, гуарова смола, гуар гідроколоїд	Насіння гуару	E412	Загущувач, стабілізатор	0,2–1,0
Локустова	Локустова камедь, карамельна камедь, ріжкова камедь, ріжкове дерево камедь	Насіння ріжкового дерева	E410	Загущувач, стабілізатор, емульгатор	0,1–1,5
Арабська	Арабська камедь, камедь акації, акацієва смола	Смола акації	E414	Загущувач, стабілізатор, емульгатор	0,5–5,0
Карбоксиметилцелюлоза	Целлюлозна камедь, CMC, карбоксиметилцелюлозний гідроколоїд	Целюлоза	E466	Загущувач, стабілізатор, плівкоутворювач	0,1–2,0
Інулін	Фруктан, інулінова камедь, пребіотичний інгредієнт, цукровий інулін	Коріння цикорію, топінамбура, агави	E425 / E957	Пребіотик, замінник жиру, загущувач	2–10
Гіпромелоза	Гідроксипропілметилцелюлоза, HPMC, целюлозна камедь	Целюлоза	E464	Загущувач, стабілізатор	0,1–1,0

Уніфікована назва	Існуючі та альтернативні назви	Джерело	Е-код	Основні функції	Орієнтовна доза використання (%)
Тапіока	Тапіокова камедь, камедь касави, маніокова камедь	Корінь касави	E407a	Гелеутворювач, стабілізатор	0,5–2,0
Каррагінан	Ламінарія, червоні морські водорості камедь, каррагінан E407	Червоні морські водорості	E407	Гелеутворювач, стабілізатор	0,1–1,5
Трагакант	Драгандська камедь, смола *Tragacanth*, перська камедь	Смола *Tragacanth*	E413	Загущувач, емульгатор, стабілізатор	0,1–1,0
Камедь карайя	Камедь стеркулії, Sterculia gum, Gum Karaya, Indian gum, Gum Sterculiae	Смола дерева Sterculia urens, родина Sterculiaceae	E416	Загусник і стабілізатор	0,1–2

Приклади застосування включають: додавання ксантанової камеді (0,25–0,50%) у крохмальні гелі для зменшення синерезису, тоді як камедь ріжкового дерева менш ефективна у цій рецептурі. У безглютеновій локшині гуміарабік знижує жорсткість та міцність екструдованої структури. У пшеничному хлібі камеді покращують структуру глютену, пом’якшують м’якушку, уповільнюють ретроградацію та підтримують текстуру протягом усього терміну придатності.

Деякі їстівні камеді мають корисні для здоров’я властивості, що сприяють одужанню при виразках, кашлюку, астмі, захворюваннях нирок та сечовивідних шляхів, а також прискорюють процес загоєння. Антиоксидантні та антимікробні ефекти залежать від складу камеді, молекулярної маси, рівня розгалуження та технології екстракції.

Їстівні камеді підвищують стабільність продуктів при заморожуванні та розморожуванні, запобігаючи синерезису крохмалю. Вони також використовуються для інкапсуляції біологічно активних речовин, що дозволяє зберігати поживні компоненти, смак і колір продукту, а також покращує всмоктування речовин у шлунково-кишковому тракті.

13.8. Застосування їстівних камедей у різних харчових секторах

Інтеграція їстівних камедей у харчові продукти виконує численні функції, серед яких підвищення якості продукту, подовження терміну його стабільності, контроль реологічних властивостей та інші технологічні ефекти. Зокрема, їх застосування було детально вивчено у хлібопекарській, кондитерській, напойній та молочній промисловості, де камеді сприяють покращенню текстури, стабілізації емульсій, утриманню вологи, запобіганню синерезису та оптимізації органолептичних характеристик продуктів.

Таблиця 27 – Застосування їстівних камедей у різних харчових секторах

Харчовий сектор	Функції їстівних камедей	Приклади продуктів
Хлібобулочні та кондитерські вироби	Покращення структури глютену, пом'якшення м'якушки, уповільнення ретроградації крохмалю, стабілізація кремів і начинок	Пшеничний хліб, безглютенова локшина, кондитерські креми, торти
Молочні продукти	Загущення, покращення текстури, стабілізація суспензій, контроль відділення сироватки, емульгування жирів	Йогурти, десерти на основі молока, сири, сирні продукти
М'ясні та рибні продукти	Утримання вологи, покращення текстури, стабілізація емульсій, подовження терміну зберігання	Фарші, ковбасні вироби, копчені та варені продукти
Напої	Стабілізація суспензій, запобігання осадженню, контроль в'язкості, покращення емульгування	Соки, фруктові напої, молочні та рослинні напої
Заморожені продукти	Запобігання утворенню кристалів льоду, контроль текстури, підвищення кремоподібності, запобігання синерезису	Морозиво, сорбети, заморожені страви та соуси
Смажені та закусочні продукти	Зменшення поглинання жиру, покращення текстури та хрусткості	Картопля фрі, чіпси, снекові вироби
Функціональні та спеціальні продукти	Пребіотичні властивості, заміна жиру, низькокалорійне загущення, антиоксидантні та антимікробні властивості	Дієтичні продукти, харчові добавки, продукти для здоров'я кишечника, спеціальні нутрієнтні суміші

Їстівні камеді підвищують харчову, сенсорну та технологічну якість продуктів, забезпечують стабільність і безпечність виробів, залишаючись універсальним інгредієнтом у багатьох харчових секторах.

13.8.1. Хлібопекарська промисловість

Випічка, така як хліб, печиво, крекери, тістечка та мафіни, потребує використання їстівних камедей, таких як ксантанова камедь, гуарова камедь, камедь ріжкового дерева та карагенан, для отримання високоякісних та стійких до зберігання продуктів. Їх застосування підтримує сенсорні якості виробів, збільшуючи об'єм і пористість хліба, а також мінімізує ретроградацію крохмалю та черствіння протягом терміну придатності, що підвищує сприйняття продукту споживачами.

Після випікання вироби схильні до ретроградації крохмалю, яку пригнічують їстівні камеді завдяки здатності зв'язуватися з молекулами води. Їстівні камеді відіграють ключову роль у виробництві різних сортів хліба, таких як пшеничний, житній, багатий на білок, заморожене тісто для хліба та безглютенові вироби. Додавання камедей забезпечує ніжну крихту та порівняно твердішу скоринку у випечених буханцях.

Глютен є основним компонентом, який надає пшеничним хлібобулочним виробам ідеальну структуру, текстуру та відчуття в роті. Виробництво безглютенових хлібобулочних виробів вимагає альтернативних інгредієнтів для оптимізації розвитку тіста та покращення когезійності, утримання та виділення газу, що забезпечує відповідний об'єм. Завдяки чудовій здатності утримувати вологу, їстівні камеді у безглютенових рецептурах імітують реологічні та структурні властивості глютену.

Введення камедей покращує толерантність тіста до змішування та скорочує час розвитку тіста. Подальші функції включають підвищення об'ємної щільності, утримання вологи, покращення клейстерних властивостей та здатності поглинати воду. Наприклад, додавання ксантанової камеді до безглютенового хліба уповільнює черствіння, запобігає ретроградації та зберігає сенсорні властивості, подібні до пшеничного хліба.

Аналогічні ефекти спостерігаються у виробництві тортів без яєць, де камеді забезпечують необхідну текстуру м'якушки, м'якість, структуру та об'єм.

Утримання газів під час стадії розвитку тіста та їх поступове вивільнення під час випікання досягається за допомогою їстівних камедей.

Включення камедей у рецептури печива без пшениці значно покращує коефіцієнт намазування, товщину, діаметр та текстуру, наближаючи їх властивості до печива на основі пшениці. Наприклад, було розроблено печиво з гречаного та безглютенового борошна з додаванням ксантанової камеді для максимальної імітації дії глютену. Дослідження показали, що додавання ксантанової камеді покращує фізичні параметри печива, такі як діаметр, товщина, вага та крихкість, а сенсорна оцінка кольору, текстури, смаку та аромату була ідентичною контрольному пшеничному печиву.

13.8.2. Кондитерська промисловість

Кондитерські вироби включають шоколад, цукерки, іриски, карамель, льодяники, мармелад, желе, пастилу, жувальну гумку та газовані продукти, такі як зефір, безе та нуга. У всіх цих продуктах використовуються їстівні камеді для покращення якості кінцевого продукту.

Зокрема, гуміарабік часто застосовують для придушення кристалізації цукрових фрагментів, регулювання вивільнення смаку та швидкості плавлення, що забезпечує тривале задоволення під час споживання. Додавання їстівних камедей до кондитерських виробів мінімізує виникнення явищ, що погіршують якість, таких як жировий або цукровий наліт.

Їстівні камеді рівномірно розподіляють молекули ліпідів у таких продуктах, як карамель та іриски, покращуючи жувальність та відчуття в роті. Вони також функціонують як зв’язуючий компонент у виробах з низьким вмістом цукру, одночасно запобігаючи небажаній кристалізації у продуктах з високим вмістом цукру.

Камеді виконують роль покриття, глазурі та поглинаючих речовин у шоколаді, що покращує естетичні характеристики виробів. У жувальній гумці вони утримують вологу, забезпечуючи бажану м’якість, насиченість та текстуру кінцевого продукту.

Рецептури кондитерських виробів на молочній основі, таких як карамель, іриски та шоколад, потребують належного емульгування для запобігання відділенню жиру, що досягається шляхом додавання їстівних камедей. Вони глазурують поверхню виробів так, щоб плавлення відбувалося лише в роті, а не в руках. Прозорі кондитерські вироби, такі як льодяники на паличці, жувальні цукерки та желе, потребують покриттів або глазуруючих агентів для збереження прозорості протягом усього терміну придатності.

Їстівні камеді також виконують функції емульгаторів, загусників, зміцнювачів, зв'язуючих агентів, стабілізаторів, зволожувачів та засобів для обробки поверхні. Наприклад, гуміарабік у пористих кондитерських виробах значно підвищує здатність до збивання та стабілізацію збитого продукту, а також слугує носієм ароматизатора, загусником, емульгатором і клеєм у м'яких цукерках.

Окрім гуміарабіку, у кондитерській промисловості успішно застосовують трагакант, агар та карбоксиметилцелюлозу для стабілізації суспензій, оптимізації в'язкості та зменшення поверхневого натягу між масляною та водною фазами емульсії, особливо у шоколаді.

Також розроблено жувальні цукерки на основі геланової камеді як альтернативу продуктам на основі желатину, що робить їх придатними для вегетаріанців. Значне додавання геланової камеді до рецептури покращує сенсорні характеристики, такі як прозорість, колір та сприйняття смаку, а також оптимізує текстурні параметри — твердість, жувальність та еластичність, порівняно з жувальними цукерками на основі желатину.

13.8.3. Застосування їстівних камедей у молочних продуктах

Їстівні камеді широко застосовуються у виробництві різних молочних продуктів, включаючи кисломолочні та молочні коктейлі, ферментоване молоко, крижане молоко, йогурт, морозиво, пудинги та сир. Для підвищення якості цих продуктів використовують такі камеді, як гуміарабік, гуарова камедь, камедь

ріжкового дерева, конжакова камедь маннан, перська камедь та карбоксиметилцелюлоза.

У морозиві та заморожених молочних десертах їстівні камеді забезпечують збільшення об'єму без руйнування емульсії, зберігають смакові властивості, підтримуючи структуру дрібних кристалів льоду та запобігаючи утворенню великих кристалів. Крім того, вони допомагають зберігати текстуру продукту під час розморожування, що позитивно впливає на смакові якості.

У дослідженнях знежиреного морозива показано, що камедь насіння базиліка забезпечує більш кремову текстуру та стабільність плавлення, тоді як гуарова камедь підвищує сенсорні оцінки. Комбінування цих камедей дозволяє відтворити характеристики морозива з високим вмістом жиру.

Основна мета використання їстівних камедей у молочних продуктах – продовження терміну придатності за рахунок стабілізації білкових частинок, зменшення агломерації казеїнових міцел та підтримки суспендованих нерозчинних компонентів. При зниженні pH підкисленого молока нижче 5 білки стають нестабільними, що призводить до флокуляції та седиментації; камеді допомагають стабілізувати білкову структуру та запобігти цьому явищу.

Йогурт під час зберігання зазнає синерезису, що погіршує текстурні властивості, такі як твердість, клейкість та пружність. Додавання їстівних камедей зміцнює матрицю йогурту, підтримуючи його якість протягом усього терміну придатності. У пробіотичних йогуртах камеді створюють захисний шар, що підвищує життєздатність мікроорганізмів.

Проблема розділення сироваткового білка у знежиреному йогурті вирішується додаванням ксантанової камеді та камеді ріжкового дерева, що значно зменшує синерезис, зберігає твердість і забезпечує кремову, насичену текстуру. Настоювання системи з камедями підсилює здатність йогурту зв'язувати воду та запобігати відділенню сироватки.

Деякі їстівні камеді використовуються як замінники жиру у продуктах із високим його вмістом, наприклад у сирах. Додавання трагаканту у сир чеддер дозволяє досягти бажаних реологічних та текстурних властивостей, таких як

жувальна здатність і твердість, а також формування цілісної 3D-структури. У сирних пастах, які є емульсіями вода-в-олії і схильні до розпаду під час зберігання, камеді, наприклад карая, виконують роль стабілізатора, забезпечуючи однорідність і легкість намазування продукту.

Молочні продукти, такі як йогурти, десерти на основі молока, сири та сирні продукти, активно використовують їстівні камеді для покращення текстури, стабілізації суспензій і загущення. Їхнє застосування запобігає відділенню сироватки, підтримує однорідну консистенцію та покращує органолептичні властивості продукту. Камеді, такі як ксантанова, гуарова, камедь ріжкового дерева та карагенан, додають у йогурти і молочні десерти для підвищення в'язкості, стабілізації колоїдних систем і запобігання утворенню осаду під час зберігання.

У сирах та сирних продуктах їстівні камеді виконують роль емульгаторів та загусників, сприяючи рівномірному розподілу води та жиру. Це покращує пластичність, текстуру та однорідність продукту, запобігає відокремленню компонентів під час термообробки або тривалого зберігання. Камеді також підтримують структуру білково-жирових емульсій, забезпечуючи стабільність і якість готового продукту.

У молочних напоях, таких як молочні коктейлі та рослинні напої, їстівні камеді стабілізують суспензії, запобігають осадженню частинок і контролюють в'язкість продукту. Вони забезпечують однорідну текстуру, покращують відчуття продукту в роті та рівномірний розподіл ароматизаторів і емульгованих жирів. Камеді, такі як карагенан та гуарова, підтримують кремоподібність і запобігають відділенню жирової фази, а ксантанова камедь забезпечує стабільність фруктових або пектинових компонентів у йогуртах і десертах.

Завдяки своїм властивостям їстівні камеді підвищують харчову, технологічну та сенсорну цінність молочних продуктів. Вони сприяють стабільності, покращують текстуру та подовжують термін придатності продуктів, забезпечуючи споживачам однорідний, приємний на смак та якісний продукт.

13.8.4. Застосування їстівних камедей у м'ясних та рибних продуктах

М'ясні та рибні продукти, такі як фарші, ковбасні вироби, копчені та варені продукти, широко використовують їстівні камеді для покращення текстури, стабілізації емульсій та утримання вологи. Їхнє застосування запобігає відокремленню жирової та водної фаз, підвищує соковитість і сприяє однорідності продукту. Камеді, такі як ксантанова, гуарова, камедь ріжкового дерева та карагенан, додають у м'ясні фарші для підвищення зв'язування компонентів, покращення когезії та запобігання втраті соку під час термічної обробки.

У ковбасних та варених продуктах їстівні камеді сприяють утриманню вологи, забезпечують стабільність емульсії та покращують текстуру м'якушки. Вони підтримують рівномірний розподіл білка та жиру, запобігаючи відокремленню компонентів під час зберігання та при температурних коливаннях. Використання камедей також дозволяє оптимізувати консистенцію фаршів, зменшити втрати під час смаження чи варіння та підвищити об'єм продукту.

У рибних продуктах камеді допомагають стабілізувати суспензії білкових та жирових компонентів, покращують структуру та текстуру рибних пюре, котлет і продуктів на основі філе. Вони запобігають розшаруванню під час заморожування та розморожування, підвищують здатність продукту утримувати воду та жир, що забезпечує соковитість і приємну текстуру.

Завдяки своїм властивостям їстівні камеді підвищують технологічну, харчову та сенсорну цінність м'ясних і рибних продуктів. Вони забезпечують однорідну структуру, покращують утримання вологи та стабільність продукту, подовжують термін придатності та підтримують якість при термічній обробці і зберіганні.

13.8.5. Виробництво напоїв з додаванням камедей

Гуміарабік, ксантанова камедь, карбоксиметилцелюлоза та альгінати є найпоширенішими їстівними камедями, що застосовуються в напоях як емульгатори, стабілізатори, загусники та наповнювачі. Реологічні властивості

напою визначають сприйняття його смаку, рівень каламутності, питкість, слизькість та загальні відчуття в роті, які можна оптимізувати за допомогою введення їстівних камедей.

Їстівні камеді сприяють рівномірному розподілу інгредієнтів у матриці напою, покращуючи сенсорні властивості, такі як смак, колір та відчуття в роті. Вони також підвищують консистенцію напою, забезпечуючи однорідний розподіл твердих частинок у суспензії та більш приємне відчуття при споживанні.

Піноутворююча здатність і стабільність піни мають ключове значення для напоїв, таких як пиво, кава та чай, де їстівні камеді забезпечують стабілізацію піни та її рівномірний розподіл на поверхні напою на різних етапах виробництва, зберігання та реалізації.

Порошки для розчинних напоїв відчутно реагують на фактори навколишнього середовища через високу гігроскопічність. Це можна коригувати за допомогою їстівних камедей, які знижують активність води та міжчастинкову адгезію. Вони також покращують однорідність розподілу частинок і об'ємну щільність порошкоподібних напоїв, підвищуючи їх розчинність.

Їстівні камеді створюють захисний бар'єр навколо чутливих компонентів, таких як вітамін С, що дозволяє зберігати їх під час сушіння при високих температурах. У фруктових соках важливими для сприйняття споживачем є каламутність, відчуття свіжості та консистенція в роті. Справжній фруктовий сік містить м'якоть у формі суспензії, яку важко підтримувати протягом терміну придатності, проте введення їстівних камедей вирішує цю проблему.

Крім тривалого збереження продукту, їстівні камеді додають насиченості та покращують смакові характеристики молочних напоїв. Трагакант і гуміарабік є важливими загусниками у рецептурах молочних коктейлів, забезпечуючи напою низьку в'язкість, стабільність і легкість наливу.

Концентровані напої потребують розведення перед вживанням, що потребує збереження каламутності та однорідності навіть після додавання води. Наприклад, ксантанова камедь, як ефективний гідроколоїд, стабілізує колір, смак

та текстуру напою під час розведення, покращуючи його смакові властивості без погіршення сенсорики.

Більшість безалкогольних напоїв мають низький pH, що потребує емульгування та стабілізації кольору та смаку за допомогою їстівних камедей. Крім того, вони виконують роль освітлювальних і флокулюючих агентів у алкогольних напоях, таких як пиво та вино; забезпечують помутніння фруктових соків та виступають інкапсулюючими агентами у порошкоподібних напоях швидкого приготування.

13.8.6. Використання камедей при виробництві заморожених продуктів

Молочні заморожені продукти. Їстівні камеді, такі як гуарова камедь, камедь насіння базиліка та гуміарабік, широко використовуються у морозиві, замороженому молоці та молочних десертах. Вони підтримують дрібні кристали льоду, запобігаючи утворенню великих кристалів, забезпечують кремову текстуру та рівномірне плавлення продукту. Камеді стабілізують емульсії, зберігають смак і аромат, а також утримують повітря, що робить морозиво більш легким і пухким.

Фруктові та ягідні пюре та десерти. У фруктових та ягідних заморожених продуктах камеді виконують роль стабілізаторів і загусників, підтримуючи однорідність пюре і запобігаючи розшаруванню та осіданню фруктових частинок. Вони також допомагають зберегти природний колір, консистенцію та свіжість смаку після заморожування та розморожування, роблячи продукти більш привабливими для споживача.

Соуси та супи. У заморожених соусах і супах камеді покращують в'язкість і текстуру, запобігаючи відокремленню водної та жирної фаз. Вони забезпечують однорідність продукту під час заморожування та повторного нагрівання, зберігаючи смак і аромат. Камеді також допомагають утримувати суспендовані частинки овочів або м'яса, роблячи консистенцію більш стабільною і приємною.

Готові заморожені страви. Для комплексних готових заморожених страв (запіканки, котлети, овочеві суміші) камеді виконують функцію стабілізаторів і

загусників, підтримуючи структуру білкових і крохмалевих компонентів. Вони запобігають агломерації та осіданню інгредієнтів, покращують текстуру після розморожування та зберігають цілісність страви, підвищуючи її привабливість і якість.

Загальні переваги додавання камедей. Додавання їстівних камедей у будь-які заморожені продукти підвищує їхню стабільність, сенсорні властивості та термін придатності. Камеді забезпечують однорідність структури, підтримку текстури, захист від утворення кристалів льоду або осідання компонентів, зберігають смак, аромат і колір, роблячи продукт більш привабливим для споживача.

13.9. Проблеми у застосуванні їстівних камедей

Їстівні камеді мають значний потенціал для модифікації реологічних властивостей харчової матриці, таких як в'язкість, еластичність та здатність до гелеутворення, що дозволяє досягти оптимальних сенсорних характеристик, особливо текстури та відчуття в роті. Незважаючи на численні переваги, які забезпечує використання їстівних камедей, існують певні проблеми, які потребують подальших досліджень.

По-перше, вибір камедей має базуватися на мінімальному впливі на сенсорні властивості продукту, зокрема на оптичні характеристики, смаковий профіль та харчову цінність кінцевого продукту. Їх слід застосовувати в мінімально необхідних концентраціях для забезпечення функціональності, при цьому зберігаючи якість сенсорного сприйняття. Наприклад, рослинний крохмаль може успішно використовуватися у концентрації 2–5%, не погіршуючи характеристики готового продукту.

Класифікація, пропорції та поєднання різних їстівних камедей залежать від типу продукту, тому кожен випадок потребує ретельного дослідження для досягнення оптимальної продуктивності. Синергетичний ефект комбінації кількох камедей також вимагає додаткових досліджень для підвищення функціональних характеристик продукту.

Важливим завданням є виявлення взаємодії між їстівними камедями та іншими харчовими компонентами. Крім того, необхідно оцінювати хімічну стабільність камедей під впливом механічних сил, змін pH та температурних коливань. Оскільки їстівні камеді можуть бути нестійкими до різних технологічних умов, важливо підбирати камедь відповідно до конкретної обробки.

Їстівна камедь також має бути стійкою до впливу мікроорганізмів протягом виробничого процесу. Комерційна доступність та економічна доцільність також визначають вибір конкретної камеді для продукту. В остаточному підсумку, саме реологічні характеристики готового продукту визначають, яка камедь найкраще виконує заплановану функцію. Наприклад, хоча ксантанова камедь дорожча за крохмаль, карбоксиметилцелюлозу чи пектин, вона забезпечує більш глибокі та стабільні функціональні властивості, що робить її переважним вибором у багатьох технологіях.

13.10. Аспекти безпеки та регуляторного забезпечення

Їстівні камеді традиційно класифікуються як харчові добавки або харчові інгредієнти. Безпека та технічні характеристики їстівних камедей ретельно контролюються організаціями, що регулюють безпеку харчових продуктів, по всьому світу. Їстівні камеді повинні бути схвалені FDA як GRAS (Generally Recognized As Safe), крім того, не повинно бути жодних доказів шкідливого впливу на здоров’я людини від їхнього застосування в їжу. Харчові камеді, які не були схвалені відповідними державними органами, не дозволено законно включати до складу харчових продуктів.

Концентрацію їстівних камедей у харчових продуктах, кількість та регулярність їх споживання конкретним споживачем, а також їхню поведінку в травній та видільній системах необхідно враховувати перед схваленням. Їстівні камеді, що використовуються в харчовій системі, повинні бути доведені як нешкідливі за умов їхнього передбачуваного використання, інакше їм може бути відмовлено в сертифікації GRAS. Накопичення значної кількості їстівних

камедей в тканинах людини може призвести до токсичності, що становить потенційну загрозу для здоров'я. Тим не менш, натуральні їстівні камеді переважають синтетичні харчові добавки з точки зору безпеки.

Оскільки кожна країна має свою систему законів, що регулюють харчові добавки, чіткий перелік дозволених компонентів та рівні безпеки є важливими для розвитку торгівлі харчовими продуктами, рекомендуються міжнародні стандарти. Регулюючі органи визначають допустимі рівні включення їстівних камедей на основі їхньої допустимої добової норми споживання (ADI) – кількості, яку можна споживати щодня без будь-яких негативних наслідків для здоров'я. Оскільки їстівні камеді ефективні при нижчих концентраціях, вони зазвичай не становлять загрози для здоров'я людини. Однак деякі виробники можуть використовувати їстівні камеді у великих кількостях для підвищення стабільності або застосовувати нехарчові або низькоякісні камеді для збільшення прибутку, що може наражати здоров'я споживачів на ризик.

Їстівні камеді мають потенціал переосмислити майбутнє харчової промисловості, сприяючи розробці нових харчових продуктів. Серед них – низькокалорійні продукти зі зниженим вмістом жиру та цукру; продукти швидкого приготування, включаючи дегідратовані напої, порошки для супів та соусів з текстурою та відчуттям у роті, подібними до оригінальних продуктів; веганські продукти рослинного походження як аналоги м'яса; інкапсуляція біологічно активних сполук у функціональних продуктах. Очікується, що їстівні камеді сприятимуть споживанню харчових продуктів зі здоровими властивостями та високим поживним профілем. Наприклад, інкапсуляція харчових продуктів, просочених пробіотиками, з використанням їстівних камедей покращує виживання мікроорганізмів у кишечнику.

Їстівні камеді також використовуються в розробці пакувальних матеріалів для збереження якості та свіжості харчових продуктів протягом усього терміну зберігання. Прогнозується, що майбутнє їстівних камедей буде багатообіцяючим і прокладе шлях для інноваційних продуктів, що відповідають зростаючому попиту споживачів на натуральну, стійку та поживну їжу. Важлива роль їстівних

камедей у формуванні майбутнього харчової промисловості змінюватиметься разом із розвитком технологій та очікувань споживачів.

Їстівні камеді – це ефективні носії, які регулюють та оптимізують реологічні властивості харчових продуктів для досягнення ідеального відчуття в роті та структурних характеристик, а також забезпечують хімічну стабільність протягом усього терміну придатності. Вони взаємодіють з молекулами води в харчовій матриці, забезпечуючи оптимальні фізико-хімічні властивості продукту. Камеді сприятливо впливають на сенсорні характеристики, зокрема на збереження аромату та контрольоване вивільнення смаку, що підвищує загальне сприйняття продукту споживачем.

Настоювання їстівних камедей дозволяє продовжити термін придатності харчових продуктів, зберігаючи їх якість та структурну цілісність. Інтеграція камедей як критичного компонента у розробку нових продуктів революціонізувала харчову промисловість, дозволяючи виробляти дієтичні продукти, такі як веганські, безглютенові, низькокалорійні та знежирені, із сенсорним профілем, ідентичним традиційним.

Їстівні камеді, отримані з натуральних джерел та сертифіковані FAO як GRAS, є значно безпечнішими для споживання людиною порівняно з синтетичними харчовими добавками. Вони надають нові можливості для впровадження концепції «чистої етикетки», замінюючи синтетичні компоненти на натуральні та здорові альтернативи. Окрім використання як харчового інгредієнта, тривають дослідження щодо застосування їстівних камедей у виробництві екологічно чистої та стійкої упаковки для харчових продуктів, що відкриває нові перспективи у розвитку сталого харчового виробництва.

13.11. Інновації у використанні камедей

Їстівні камеді відіграють важливу роль у створенні функціональних харчових продуктів. Завдяки своїм здатностям модифікувати текстуру, в’язкість та гелеутворення, вони дозволяють розробляти продукти з поліпшеними сенсорними характеристиками, низьким вмістом калорій та зменшеним вмістом

жиру й цукру. Камеді сприяють виробництву веганських альтернатив м'яса, молочних продуктів та інших інноваційних харчових рішень, що відповідають сучасним потребам споживачів.

Інкапсуляція біологічно активних компонентів є ще однією значущою інновацією. Камеді використовують для захисту пробіотиків, вітамінів та інших корисних речовин, підвищуючи їхню стабільність та виживання в травній системі. Це відкриває нові можливості для функціональних і медичних харчових продуктів, покращуючи їхню ефективність та користь для здоров'я.

Їстівні камеді широко застосовують у виробництві напоїв, супів та соусів. Вони дозволяють створювати стабільні емульсії, контролювати текстуру та в'язкість, а також забезпечують рівномірне вивільнення смакових компонентів під час споживання. Це робить продукти більш привабливими для споживача та покращує їхні органолептичні властивості.

Камеді також використовуються для створення екологічно чистих та біорозкладних пакувальних матеріалів. Такі матеріали допомагають зберігати якість та свіжість харчових продуктів протягом тривалого часу, зменшуючи потребу у синтетичних полімерних упаковках.

Сучасні інноваційні технології дозволяють комбінувати різні типи камедей — рослинні, мікробні та морські — для підвищення функціональності продуктів. Такі синергетичні поєднання регулюють гелеутворення, в'язкість та стабільність харчових матриць без втрати сенсорних характеристик.

Розробляються також камеді, стійкі до високих температур, змін pH та механічних навантажень. Це дозволяє використовувати їх у складних технологічних процесах, таких як випічка, пастеризація, екструзія та інші методи обробки, що розширює спектр їх застосування.

Нарешті, використання натуральних камедей сприяє розвитку концепції «чистої етикетки». Вони замінюють синтетичні загущувачі та стабілізатори, забезпечуючи більш здорові та екологічні альтернативи, що відповідає сучасним тенденціям харчового ринку та очікуванням споживачів.

Таблиця 28 – Інноваційне застосування камедей у харчових продуктах

Вид камеді	Основна технологічна функція	Інноваційні властивості	Приклади застосування
Ксантанова камедь	Загущення, стабілізація, контроль реології	Формує в'язкі системи навіть при низьких концентраціях; стабільна до pH і температур	Безглютеновий хліб, соуси, функціональні напої
Камедь гуару	Водоутримання, текстуроутворення	Підвищує кремоподібність і знижує синерезис	Заправки, десерти, морозиво
Альгінати	Іонне гелеутворення, інкапсуляція	Формують термостійкі гелі, використовуються для капсулювання біоактивних речовин	Пробіотичні капсули, імітація ікри, функціональні продукти
Карагенан	Стабілізація білкових систем	Взаємодіє з молочними білками, формує ніжну текстуру	Шоколадне молоко, пудинги, рослинні альтернативи молока
Камедь рожкового дерева	Синергетичне загущення	Посилює дію інших гідроколоїдів, покращує термостійкість	Морозиво, креми, веганські продукти
Камедь акації	Емульгування, стабілізація ароматів	Утворює стабільні емульсії з низькою в'язкістю	Напої з ароматичними оліями, спортивне харчування
Агар	Формування міцних термооборотних гелів	Дає стабільні структури без потреби у високому вмісті цукру	Десерти, желейні вироби, кулінарні інновації
Камедь карайї	Плівкоутворення, стабілізація	Використовується у біорозкладних покриттях та харчових плівках	Їстівні покриття фруктів, екологічна упаковка

Сучасні технології розглядають камеді не лише як загущувачі, а як багатофункціональні біополімери, що дозволяють керувати структурою, стабільністю, біодоступністю нутрієнтів і навіть екологічністю упаковки. Їх комбінування відкриває можливості створення продуктів нового покоління — функціональних, рослинних, низькокалорійних та зі «clean label» складом.

Питання для самоконтролю

1. Які проблемні питання слід враховувати при розробці інноваційних технологій отримання камедей із рослинних та мікробних джерел?
2. Що таке їстівні камеді та які їх основні характеристики?
3. За якими категоріями класифікують їстівні камеді?
4. З яких основних компонентів складаються ексудати камеді?

5. Які складові містять камеді, отримані з насіння?

6. Які камеді з насіння застосовують у харчовому виробництві?

7. З яких видів морських водоростей добувають їстівні камеді?

8. Що собою представляють камеді, такі як каррагенан і агар?

9. Що таке мікробні камеді та які їх особливості?

10. Що розуміють під виробництвом камедей тваринного походження?

11. В чому полягає харчова цінність їстівних камедей?

12. Які основні принципи лежать в основі функціональних характеристик їстівних камедей?

13. Що таке емульгування та яку роль у ньому відіграють камеді?

14. Як їстівні камеді застосовують у хлібопекарському виробництві?

15. За якими критеріями використовують їстівні камеді у кондитерських виробах?

16. Які властивості їстівних камедей використовують при виробництві різноманітних напоїв?

17. У яких молочних продуктах найефективніше застосовувати їстівні камеді?

18. З якими проблемами стикаються виробники при використанні їстівних камедей?

Рекомендована навчальна література

1. Харчові добавки : підручник / І. П. Радзієвська, Т. П. Новікова, О. С. Корзун та ін. Київ : Кондор, 2018. 324 с.

2. Грегірчак Н. М. Харчові добавки : навч. посіб. / Н. М. Грегірчак. Київ : НУХТ, 2016. 240 с.

3. Фурсік О. В. Технологія структурованих харчових продуктів : навч. посіб. / О. В. Фурсік, В. М. Пасічний. Київ : НУХТ, 2018. 164 с.

4. Пирог Т. П. Загальна біотехнологія : підручник / Т. П. Пирог. Київ : НУХТ, 2009. 336 с.

5. Біополімерні матеріали для пакування харчових продуктів : навч. посіб. / В. М. Пасічний та ін. Київ : НУХТ, 2021. 215 с.

6. Handbook of Hydrocolloids / ed. by G. O. Phillips, P. A. Williams. 3rd ed. Woodhead Publishing, 2020. 948 p.

7. Nussinovitch A. Plant Gums: Exudates and Polysaccharides / A. Nussinovitch. New York : Academic Press, 2009.

8. Microbial Polymers / ed. by A. S. Patil et al. Springer, 2021.

Розділ 14. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ЦЕЛЮЛОЗИ ТА ЇЇ ПОХІДНИХ

14.1. Види та класифікація целюлози

Целюлоза є найпоширенішим природним полісахаридом на Землі. Вона міститься у великій кількості різноманітних джерел, зокрема в клітинних стінках деревини та вищих рослин, у деяких видах бактерій і водоростей, а також у тунікатів — єдиних відомих тваринних організмів, здатних синтезувати та накопичувати целюлозу. Її значна природна поширеність створює передумови для відкриття нових напрямів використання цього універсального матеріалу.

> **Тунікати (покривники)** — це підтип хордових тварин, широко поширених у Світовому океані, де вони мешкають переважно на морському дні. Більшість видів у дорослому стані веде прикріплений спосіб життя і не здатна до активного пересування. Їхнє тіло має характерну мішкоподібну форму та вкрите зовнішньою оболонкою — тунікою, що складається з туніцину, речовини, за хімічною природою подібної до целюлози.

Целюлоза — це природний полімер, що входить до складу клітинних стінок рослин, тоді як її похідні являють собою хімічно модифіковані форми, створені для покращення властивостей, зокрема розчинності у воді та функціональності. До найпоширеніших похідних належать ацетат целюлози та целюлозні ефіри, наприклад карбоксиметилцелюлоза, які широко застосовуються в різних галузях — від фармацевтики й харчової упаковки до біомедичних технологій.

Ефективне виділення целюлози з лігноцелюлозної біомаси є ключовою умовою її подальшого високовартісного використання. Одержану целюлозу застосовують переважно в хімічній, енергетичній та матеріалознавчій сферах. У хімічній промисловості вона використовується головним чином як сировина для процесів гідролізу та подальшої ферментації: внаслідок гідролізу отримують різні полісахариди, а шляхом ферментації — біоетанол.

В енергетичному напрямі одним із основних об’єктів досліджень є одержання біоолій з целюлозної сировини. Останніми роками значна прикладна цінність целюлози привертає дедалі більшу увагу науковців і технологів.

Особливо перспективними вважаються розроблення, модифікація та використання наноцелюлози й мікрокристалічної целюлози у складі полімерних композитів, що розглядається як один із провідних напрямів майбутніх досліджень і розвитку матеріалів нового покоління.

Целюлоза існує в кількох формах, кожна з яких відрізняється походженням, фізико-хімічними властивостями та сферою застосування відповідно до потреб конкретної галузі.

Альфа-целюлоза є найбільш чистою та високомолекулярною формою целюлози. Вона міститься переважно у внутрішніх шарах клітинних стінок рослин і характеризується високим ступенем полімеризації. Завдяки високій чистоті альфа-целюлоза широко використовується у виробництві паперу, текстилю та спеціалізованих хімічних продуктів.

Бета-целюлоза трапляється рідше й зазвичай локалізується в середніх шарах клітинних стінок рослин. Вона має нижчий ступінь полімеризації та меншу кристалічність порівняно з альфа-целюлозою, що зумовлює її придатність для застосувань, де потрібна підвищена гнучкість матеріалу.

Гамма-целюлоза — це аморфна форма з найнижчим ступенем полімеризації, яка міститься переважно у зовнішніх шарах клітинних стінок. Вона менш структурно стабільна, проте характеризується високою здатністю до водопоглинання, тому використовується, зокрема, у виробництві гідрогелів.

Мікрокристалічна целюлоза є технологічно обробленою формою, яку отримують шляхом часткової деполімеризації альфа-целюлози. Утворені мікрокристалічні частинки мають добру сипкість і стисливість, що зумовлює їх широке використання як допоміжної речовини у фармацевтичній і харчовій промисловості — переважно як наповнювача або зв’язувального компонента таблетованих форм.

Гідроксипропілцелюлоза — це модифікований ефір целюлози, утворений введенням гідроксипропілових груп, що підвищує її розчинність, загущувальні та водоутримуючі властивості. Вона застосовується як загусник,

плівкоутворювач і зв’язувальна речовина у фармацевтичній, косметичній та харчовій промисловості.

Гідроксиетилцелюлоза — ще один ефір целюлози, модифікований гідроксиетильними групами. За властивостями вона подібна до гідроксипропілцелюлози, забезпечує ефективне загущення та утримання води й широко використовується не лише в харчових і косметичних системах, а й у будівельних матеріалах для покращення сумісності компонентів.

Карбоксиметилцелюлоза — це похідна целюлози, отримана введенням карбоксиметильних груп. Вона утворює водорозчинні в’язкі розчини та має широке промислове застосування як загусник, стабілізатор, емульгатор і структуроутворювач у харчовій, фармацевтичній та інших галузях.

Серед різних типів целюлози альфа-целюлоза є, мабуть, найпоширенішою. Вона характеризується довгими та однорідними ланцюгами полімеру, що забезпечує високу міцність та довговічність кінцевих продуктів. Альфа-целюлозу отримують із деревної маси за допомогою серії технологічних процесів, включаючи варіння та відбілювання, і вона слугує основою для виробництва високоякісної паперової продукції.

Крім того, альфа-целюлоза відіграє важливу роль у текстильній промисловості. Її переробляють на целюлозні волокна для виготовлення тканин, таких як районні та віскозні матеріали. Такі текстильні вироби є екологічно чистою альтернативою синтетичним волокнам, пропонуючи м’якості, повітропроникність і комфорт у використанні.

Альфа-целюлоза також є ключовим компонентом у виробництві спеціальних хімікатів, наприклад, гідроксипропілметилцелюлози та етилцелюлози, які широко застосовуються у будівництві, фармацевтиці, харчовій промисловості та інших галузях. Завдяки своїм унікальним властивостям, таким як здатність до загущення, стабілізації та адгезії, похідні альфа-целюлози знаходять багатогалузеве застосування, роблячи її одним із найважливіших природних полімерів у промисловості.

У харчовій промисловості целюлоза застосовується насамперед як загусник, стабілізатор, антиприлипач та замінник жиру, що дозволяє поліпшувати текстуру продуктів і продовжувати їхній термін зберігання. Її додають у різноманітні продукти, зокрема попередньо подрібнений сир, низькокалорійне морозиво, дієтичні продукти та хлібобулочні вироби, де целюлоза забезпечує додаткову клітковину та об'єм без значного збільшення калорійності.

Модифіковані форми целюлози, такі як мікрокристалічна целюлоза та карбоксиметилцелюлоза, використовуються завдяки своїм специфічним властивостям: вони стабілізують емульсії, контролюють ріст кристалів у морозиві, покращують текстуру та загальну якість продукту. Такі форми целюлози дозволяють створювати харчові продукти з оптимальними сенсорними характеристиками та функціональністю.

Целюлоза є найважливішим біополімером на Землі. Цей природний органічний полімер найчастіше отримують із рослин, і сьогодні її значення в харчовій промисловості, засобах особистого догляду та наукових дослідженнях важко переоцінити.

Окрім рослинних джерел, целюлозу можна синтезувати in vitro за допомогою ферментативних шляхів, отримувати хімічним синтезом із похідних глюкози, а також біосинтезувати через різні мікроорганізми, зокрема водорості, гриби та деякі бактерії, такі як роди Agrobacterium, Sarcina, Rhizobium та Acetobacter.

Целюлозу також можна модифікувати хімічними методами для отримання сполук із спеціальними властивостями. Такі зміни покращують її хімічні та фізичні характеристики, що розширює спектр застосування похідних целюлози у промисловості та наукових дослідженнях.

Структурно целюлоза є полісахаридом, який складається з довгих лінійних ланцюгів D-глюкози, іноді налічуючи понад тисячу пов'язаних одиниць, що забезпечує її міцність і стабільність як природного полімеру.

Целюлоза відома також як харчові волокна. До харчових волокон належать залишки рослинних клітин, стійких до гідролізу травними ферментами шлунково-кишкового тракту людини. Основними компонентами харчових волокон є целюлоза, геміцелюлоза, лігнін, віск, пектини, камеді та слизові речовини. Ці сполуки природним чином містяться в горіхах, злаках, фруктах та овочах. Кількість і склад харчових волокон варіюються залежно від конкретного продукту або страви.

Дієта, багата на клітковину, зазвичай має нижчу калорійність, містить менше жиру, більший об'єм і багата на мікроелементи. Великий об'єм їжі вимагає більше часу на споживання, а її присутність у шлунку швидше створює відчуття ситості. Згідно з рекомендаціями, здоровим дорослим людям слід споживати від 20 до 35 г харчових волокон щодня.

Існують два основні типи харчових волокон: розчинні та нерозчинні. Нерозчинні волокна, такі як целюлоза, геміцелюлоза, лігнін та віск, утворюють об'ємну масу та прискорюють проходження їжі через шлунково-кишковий тракт. Розчинні волокна, серед яких пектини, камеді та слизові речовини, здатні утримувати воду і збільшувати в'язкість харчових сумішей.

Целюлоза та її різні похідні давно використовуються у виробництві харчових продуктів. Модифіковані целюлози (хімічно або фізично) ефективні у багатьох харчових системах завдяки своїм об'ємним і реологічним властивостям. Вони застосовуються у здорових продуктах, продуктах зі зниженим або низьким вмістом жиру, смакових олійних поглиначах та текучих продуктах, таких як штучні підсолоджувачі та ароматизовані суміші. Використання целюлози в харчовій промисловості зумовлене передусім її здатністю регулювати взаємодію з водою, покращувати текстуру та контрольовану реологію, а не лише її розчинністю чи хімічними властивостями.

14.2. Модифікація структури целюлози

Целюлоза є універсальним полімером із величезним потенціалом для хімічних та фізичних модифікацій. Завдяки цьому вона широко застосовується у

харчовій промисловості для створення модифікованих структур, здатних компенсувати природні обмеження ефективності та забезпечувати бажані функціональні властивості у різних харчових системах. Використання целюлози та її похідних дозволяє покращувати текстуру, стабільність, водоутримуючу здатність і реологічні характеристики продуктів, що робить її незамінним інгредієнтом у сучасному харчовому виробництві.

Список комерційно важливих похідних целюлози та їхні основні характеристики:

Метилцелюлоза – отримується шляхом заміщення гідроксильних груп у молекулі целюлози метоксильними групами через реакцію з метилюючим агентом, таким як метилйодид, метилхлорид або диметилсульфат. Вона характеризується високою міцністю, нетоксичністю, відсутністю смаку та запаху, а також здатністю утворювати в'язкі розчини при дуже низьких концентраціях.

Гідроксипропілметилцелюлоза – виготовляється шляхом заміщення гідроксильних груп метоксиловими та гідроксипропіловими групами. Завдяки модифікації температура гелеутворення у гарячій воді значно вища, розчинність у холодній воді покращена, в'язкість менше залежить від температури, розчин стабільний при кімнатній температурі, а здатність утримувати воду перевищує метилцелюлозу. Вона також стійкіша до ферментів і має вищу адгезію, може взаємодіяти з водорозчинними полімерами, такими як полівініловий спирт, ефіри крохмалю та рослинні камеді.

Карбоксиметилцелюлоза – утворюється шляхом введення карбоксиметильних груп у глюкопіранозні одиниці целюлози. Вона розчинна як у холодній, так і у гарячій воді, має здатність до утримання води і широко застосовується як загусник, стабілізатор та емульгатор.

Кроскармелоза натрію – натрієва сіль карбоксиметилцелюлози, отримана шляхом зшивання полімера для підвищення розчинності. Використовується як швидкорозчинний агент у фармацевтичних та харчових продуктах.

Етилцелюлоза – отримується шляхом реакції етилхлорида з лужною целюлозою. Нерозчинна у воді та гліцерині, але добре розчиняється в органічних розчинниках.

Гідроксиетилцелюлоза – отримується шляхом реакції целюлози з етиленоксидом через просочення гідроксидом натрію. Має високу водорозчинність у широкому температурному діапазоні, навіть понад 50 °C.

Гідроксипропілцелюлоза – отримується шляхом реакції лужної целюлози з пропіленоксидом. Вона є більш пластичною та відносно гідрофобною порівняно з іншими водорозчинними ефірами целюлози. Розчинна у воді та полярних органічних розчинниках (метанол, етанол, ізопропіловий спирт, ацетон), має нижчу в'язкість і повільніше гідратує воду, ніж гідроксипропілметилцелюлоза.

Мікрокристалічна целюлоза – отримується шляхом деполімеризації целюлози під впливом високого тиску та температури. Це білий, без запаху та смаку порошок із високим ступенем очищення та кристалічності, що диспергується у воді, але не розчиняється.

Поліаніонна целюлоза – отримується з алкалізованої целюлози та хлороцтової кислоти в ізопропіловому спирті шляхом етерифікації. Має високу розчинність у холодній і гарячій воді, стійка до температури та солей, має антибактеріальні властивості.

Порошкоподібна целюлоза – утворюється шляхом механічного подрібнення целюлози. Містить велику кількість аморфних ділянок і використовується як наповнювач і сполучна речовина у фармацевтичних і харчових продуктах.

Карбоксиметилгідроксиетилцелюлоза – комбінація водорозчинних ефірів целюлози, що володіє високою здатністю до гідратації та зв'язування води на суспендованих твердих речовинах, сумісна з різними катіонами, що підвищує в'язкість розчинів.

Ці похідні целюлози широко використовуються в харчовій, фармацевтичній та косметичній промисловості завдяки своїй здатності

покращувати текстуру, стабілізувати емульсії, регулювати вміст вологи та підвищувати фізико-хімічну стійкість продуктів.

Харчові полімери відіграють надзвичайно важливу роль у формуванні структури харчових продуктів, їх функціональних властивостей, технології переробки та терміну придатності. Інформація про ці сполуки має велике комерційне значення, оскільки слугує практичним керівництвом для оптимізації виробництва та підвищення якості харчових продуктів. Застосування кожного полімеру слід оцінювати з урахуванням його здатності забезпечувати стабільність продукту, стійкість до стресових умов, підтримку однорідності та покращення фізичних властивостей готової продукції.

Варіації молекулярної структури та розміру полімерних ланцюгів або мереж створюють унікальні полімери з конкретними властивостями, придатними для різних харчових систем. Для кожного полімеру важливо визначити його поведінку у відповідній харчовій системі. Наприклад, у продуктах, де важлива стабільність у водній фазі, слід використовувати водорозчинні полімери. Для рецептур на основі водонерозчинних сполук доцільно підбирати похідні полімерів із властивостями, що максимально наближені до характеристик основних інгредієнтів.

У харчових системах похідні целюлози використовують для різних цілей: як емульгатори, стабілізатори, покриття, при виробництві плівок, для гелеутворення, створення адгезивних або загусних структур. Врахування сумісності властивостей полімеру є ключовим фактором для досягнення оптимальної текстури та реології продукту. Іноді у рецептурі можна застосовувати кілька полімерів одночасно: один полімер може компенсувати недоліки іншого, а комбінація дозволяє створити більш підходящу структуру.

У відділах досліджень і розробок харчової промисловості постійно проводяться експерименти щодо заміни полімерів, оцінки їх реологічних властивостей, сенсорної оцінки та текстурних характеристик. Сьогодні розробка стабілізаторів для харчових продуктів є прибутковою галуззю та перспективним напрямом бізнесу. Багато компаній-постачальників промислової сировини

активно впроваджують нові стабілізуючі рецептури, що сприяє розвитку інновацій у харчовій промисловості та підвищує ефективність виробництва.

14.3. Функції целюлози та її похідних у харчових системах

Щоб зрозуміти функціональне значення целюлози та її похідних у харчових системах, важливо чітко визначити їхні конкретні ролі та способи застосування в харчовій промисловості.

Їстівне покриття описується як тонкий шар матеріалу, безпечного для вживання, що наноситься на поверхню харчового продукту. Такі покриття утворюють бар'єр між продуктом і зовнішнім середовищем, що уповільнює процеси дозрівання та псування. Вони широко застосовуються для запобігання втраті вологи та додання блиску фруктам і овочам, а також для обробки горіхів, смажених продуктів, морепродуктів і мінімально оброблених овочів.

Їстівна плівка – це попередньо сформований тонкий шар, виготовлений з безпечного для вживання матеріалу, який можна накладати на харчові продукти або між ними. Головна відмінність від покриття полягає в способі нанесення: покриття наноситься у рідкій формі, тоді як плівка формується у вигляді твердого листа і потім накладається на продукт.

Емульгування – це процес диспергування двох або більше незмішуваних рідин для створення напівстабільної суміші. У харчових продуктах це зазвичай олійна та водна фракції, стабілізовані емульгаторами. Емульгатори утворюють фізичні бар'єри, запобігаючи злипанню крапель, та дозволяють об'єднувати гідрофільні й гідрофобні компоненти. Наприклад, похідні целюлози, такі як карбоксиметилцелюлоза, утримують вологу у виробах, запобігаючи черствінню, та покращують текстуру у взаємодії з іншими гідроколоїдними полімерами, такими як ксантан.

Стабілізатор – це інгредієнт, що підтримує або покращує текстуру та фізико-хімічні властивості харчових продуктів. Він працює разом з емульгаторами для забезпечення однорідності дисперсії та підвищення в'язкості

продукту. Основна функція стабілізатора полягає у створенні гелеутворюючих та загусних структур до необхідної консистенції.

Контроль реології – ключовий аспект у харчовій промисловості, що забезпечує бажану консистенцію та плинність продуктів під дією механічних сил. Реологічні модифікатори дозволяють керувати стійкістю до зберігання, нанесенням, провисанням, осіданням, плівкоутворенням та відповідністю нормам.

Суспендуючий агент використовується для утримання частинок у рідинах, запобігаючи їх осіданню, що особливо важливо для напоїв та рідких продуктів із дрібними твердими частками.

Дифузійний бар'єр – це тонкий полімерний шар, що захищає продукт від проникнення газів, світла та вологи, продовжуючи термін придатності. На ефективність бар'єра впливають температура, вологість, орієнтація та зшивання плівки.

Інкапсуляція передбачає оточення активних речовин або харчових добавок покриттям для контрольованого вивільнення та приховування смаку чи запаху.

Екструзія – механічний процес видавлювання сумішей через матрицю або отвори для отримання продуктів із заданою формою, структурою, розміром і текстурою.

Формування застосовується для надання тістовій заготовці необхідної форми перед випічкою з мінімальним навантаженням та деформацією.

Стабілізатор піни підвищує довговічність рідких пін, запобігаючи коалесценції газових бульбашок, за рахунок підвищення в'язкості рідини та синергетичного ефекту з піноутворювачами.

Термопластична система – це матеріал, який розм'якшується під дією температури та затвердіває при охолодженні, що дозволяє формувати гнучкі та стійкі структури.

Таким чином, целюлоза та її похідні виконують багато важливих функцій у харчових системах, забезпечуючи стабільність, текстуру, збереження

вологості, емульгування, формування плівок та піни, а також контроль реології продуктів. Вони є універсальними інструментами для покращення якості та тривалості зберігання харчових виробів.

1.4. Інновації застосування целюлози в харчовій промисловості

У дослідженнях активно розглядається взаємозв'язок між хімічною структурою целюлози, її джерелом та різними фізико-хімічними властивостями. Хоча найбільше уваги приділялося целюлозі, отриманій з рослин, останнім часом зростає інтерес до целюлози, очищеної від мікроорганізмів і тварин, яка має унікальні структурні особливості.

Для сприяння дефібриляції целюлози під час переробки на наноцелюлозу застосовуються різні підходи, такі як ферментативний гідроліз, окислення за допомогою 2,2,6,6-тетраметилпіперидин-1-оксилу (TEMPO) та карбоксиметилювання. Ці методи не лише знижують енергетичні витрати, але й вводять додаткові функціональні групи, що підвищують практичну цінність кінцевих продуктів.

Кислотний гідроліз, що використовує неорганічні та органічні кислоти, здатен видаляти аморфні ділянки целюлози, що сприяє утворенню нанокристалів целюлози. Проте такі методи стикаються з постійними проблемами, зокрема висококорозійними умовами та низьким виходом продукту.

Механічні методи обробки, такі як рафінування, гомогенізація, мікрофлюїдизація, ультразвукова обробка, кульове подрібнення та метод водного зустрічного зіткнення, дозволяють отримувати целюлозні нанофібрили. Однак надмірне енергоспоживання цих процесів значно ускладнює їх комерційне застосування.

Бактеріальна целюлоза, спеціальний тип наноцелюлози, отриманий з бактерій, нині привертає значну увагу дослідників. Завдяки високому співвідношенню сторін та більшим діаметрам волокон, вона розглядається як перспективний матеріал для упаковки харчових продуктів. Для спрощення її застосування в харчовій упаковці наноцелюлозу обробляють різними

виробничими технологіями, серед яких лиття з розчину, пошарове накладання, екструзія, нанесення покриттів, гелеутворення, розпилювальне сушіння, електростатичне прядіння та адсорбція. Це дозволяє створювати різноманітні форми матеріалів, такі як плівки, гелі, покривні мембрани та емульсії, придатні для різних упаковкових рішень.

Завдяки нетоксичності, високій біорозкладності та біосумісності, великому співвідношенню сторін, низькому коефіцієнту теплового розширення, відмінній механічній міцності та унікальним оптичним властивостям, пакувальні матеріали на основі наноцелюлози широко застосовуються для упаковки фруктів, м'ясних продуктів, страв швидкого приготування, молочних виробів та напоїв. Крім того, наноцелюлоза та функціональні наповнювачі в нанокомпозитах на її основі забезпечують високі бар'єрні та механічні характеристики, проявляють антибактеріальну активність та реагують на подразники, що значно покращує стабільність якості харчових продуктів та подовжує термін їх зберігання.

Наноцелюлоза та її похідні у вигляді нанокомпозитів стали ключовою областю досліджень у сфері пакування харчових продуктів завдяки своїм винятковим властивостям, серед яких висока міцність, велика питома поверхня, відмінні бар'єрні характеристики, а також належна біосумісність, безпека, нетоксичність і біорозкладність. У пакувальних матеріалах для харчових продуктів нанокомпозити на основі наноцелюлози можуть виконувати функції свіжих і антибактеріальних пакувальних матеріалів, розумних упаковок і високобар'єрних покриттів, що свідчить про їх надзвичайний потенціал. Таким чином, нанокомпозити на основі наноцелюлози, як відновлюваний та екологічно чистий пакувальний матеріал, підвищують захист і якість харчових продуктів і відкривають важливі перспективи для розвитку «екологічно чистої промисловості» у харчовій галузі.

Останнім часом гідрогелі на основі біополімерів привертають дедалі більшу увагу науковців та промисловців завдяки їхньому перспективному застосуванню у різних сферах, включаючи контрольоване вивільнення ліків,

біосенсори, суперабсорбуючі матеріали, тканинну інженерію, біомедичні пристрої та багато інших галузей. Гідрогелі є водонерозчинними полімерними мережами, здатними утримувати значну кількість води у своїй структурі. Значна кількість гідрофільних функціональних груп, таких як гідроксил, карбоксил та альдегід, що формуються у структурі природної целюлози або її похідних, робить їх придатними для створення гідрогелів із високою водоутримувальною здатністю та захопливими фізико-хімічними властивостями, що є важливим для біомедичних застосувань та харчової упаковки.

Щодо прогресу використання целюлози та її похідних у харчовій промисловості, особливо у сфері пакування харчових продуктів, слід виділити кілька ключових напрямів:

Розширення джерел целюлози. Для отримання наноцелюлози високої якості досліджуються різноманітні види біомаси, окрім традиційних джерел, таких як тунікати та чорна цибуля. Це дозволяє отримувати наноматеріали з більш задовільними характеристиками та покращеною продуктивністю. Наразі більшість комерційно доступної наноцелюлози виробляється з деревини та рослинних відходів. Попередні дослідження показують, що наноцелюлоза з тунікатів і чорної цибулі має вищу загальну продуктивність порівняно з деревною наноцелюлозою, проте подальші систематичні дослідження кореляцій між джерелом, властивостями та продуктивністю наноцелюлози залишаються актуальними.

Розробка ефективних, економічних та екологічно чистих методів екстракції. Хоча існує кілька методів отримання наноцелюлози, найчастіше застосовуються гідроліз сірчаною кислотою та механічне рафінування. Проте ці підходи мають значні недоліки: екстремальні кислотні умови, високі витрати води, утворення забруднених стічних вод, великий енергетичний попит та низька вихідність матеріалу ускладнюють промислове виробництво. Тому розробка нових методів, таких як використання органічних кислот, демонструє перспективу як екологічно безпечного та енергоефективного підходу для отримання функціоналізованих похідних, включаючи наноцелюлозу.

Розробка нових процедур для створення целюлозних нанокомпозитів. У лабораторних умовах метод лиття з розчину залишається популярним для досліджень, але він не придатний для промислового виробництва. Пілотні експерименти з використанням екструзії також показали обмежену ефективність, оскільки дисперсія наноцелюлози у воді знижує продуктивність процесу. Важливим є розробка масштабованого методу приготування нанокомпозитів на основі наноцелюлози, придатного для виробництва пакувальних матеріалів для харчових продуктів.

Покращення загальної продуктивності композитів як пакувальних матеріалів. Ідеальні пакувальні матеріали повинні поєднувати кілька властивостей: стійкість до ультрафіолетового випромінювання, надійні паро- та газоізоляційні характеристики, високу механічну міцність та контрольовану гідрофобність. Особливо важливо розробити підходи для зменшення гігроскопічності наноцелюлози та підвищення її міцності у вологому стані або здатності до розтягування у вологому середовищі. Це робить матеріали більш придатними для повсякденного використання. Наприклад, попередня обробка наноцелюлози покриттям натуральним воском або реакцією етерифікації є перспективними методами для досягнення цих цілей.

Таким чином, розвиток гідрогелів та нанокомпозитів на основі целюлози відкриває широкі можливості для створення високоефективних, безпечних та екологічно чистих пакувальних матеріалів для харчової промисловості.

14.5. Розробка розумних пакувальних матеріалів на основі наноцелюлози

Наразі досягнення адаптивних властивостей целюлозних нанокомпозитів зазвичай забезпечується шляхом комбінування різних органічних та неорганічних функціональних наповнювачів. Проте питання міграції та контрольованого вивільнення цих наповнювачів, а також їхній потенційний вплив на здоров’я людини, залишаються недостатньо вивченими. У майбутніх дослідженнях необхідно приділяти увагу не лише безпеці самої наноцелюлози як основного матеріалу, але й ретельній оцінці функціональних характеристик та

біологічної безпеки обраних наповнювачів. Такий комплексний підхід дозволить розробляти нанокомпозити з високою функціональністю та мінімальним ризиком для здоров'я, що є критично важливим для харчової промисловості та упаковки харчових продуктів.

Розробка пакувальних матеріалів на основі наноцелюлози для харчових продуктів є однією з перспективних галузей досліджень, проте більшість робіт зосереджена здебільшого на підготовці матеріалів та оцінці їхніх фізико-механічних властивостей. При цьому часто недостатньо уваги приділяється взаємодії пакувальних матеріалів із самими харчовими продуктами та впливу різних факторів на їхню якість. Зокрема, необхідно враховувати вплив екологічних умов, таких як температура, вологість, світло та газова атмосфера, на зміни як характеристик пакувального матеріалу, так і якості харчового продукту, аби оцінити доцільність використання конкретних матеріалів для конкретних продуктів.

Целюлоза використовується у харчовій промисловості протягом десятиліть і продовжує набувати значення як функціональний компонент. Її переваги включають пористу мережу, біосумісність, високе співвідношення сторін та велику кількість гідроксильних груп, що забезпечує можливість створення різних колоїдних умов, таких як поверхневий заряд, розміри часток, кристалічна структура, розчинність і змочуваність. Колоїдні властивості целюлози можна коригувати, змінюючи параметри виробництва або шляхом хімічної модифікації гідроксильних груп ефірними функціональними групами. Крім того, корисні для здоров'я ефекти та функціональні впливи целюлози, такі як гіпоглікемічна та гіполіпідемічна активність, а також біодоступність у кишечнику, можуть значною мірою залежати від її колоїдного стану.

На основі аналізу сучасних досліджень у харчовій промисловості можна виділити ключові проблемні питання та перспективні напрями подальшого вивчення целюлози:

Розробка функціональних харчових продуктів – можливе шляхом зміни колоїдного стану целюлози, що дозволяє впливати на текстуру, стабільність та сенсорні властивості продукту.

Отримання нових харчових властивостей – різні колоїдні стани целюлози можуть створювати у харчовій матриці унікальні функціональні ефекти, наприклад, контроль в'язкості, утримання води чи масла, та формування емульсій.

Взаємодія з кишковою мікробіотою – механізми впливу целюлози на мікробіоту та її метаболічну активність потребують детального дослідження, що дозволить оцінити потенційні пребіотичні ефекти та користь для здоров'я.

Застосування наноцелюлози в харчових матрицях – зростаюче використання наноцелюлози потребує регуляторних випробувань та оцінки довгострокових ризиків для безпеки споживача.

Екологічні та енергетичні аспекти – необхідно враховувати споживання енергії та потенційне забруднення навколишнього середовища при виробництві целюлози, що стимулює розробку нових "зелених" технологій для екстракції та модифікації різних видів целюлози.

Таким чином, комплексний підхід до використання целюлози та наноцелюлози у харчовій промисловості передбачає одночасне вирішення завдань функціональності, безпеки та екологічності, що дозволяє розробляти інноваційні пакувальні матеріали та функціональні харчові продукти з покращеними властивостями.

14.6. Бактеріальна целюлоза

Бактеріальна целюлоза (БЦ) є природним біоматеріалом із широким спектром застосувань у харчовій промисловості завдяки своїм унікальним властивостям. Вона відзначається винятковою механічною міцністю, структурою нановолокон із високим співвідношенням сторін, високою чистотою та видатною біосумісністю. Крім фізичних характеристик, останні дослідження

демонструють потенційну користь БЦ для здоров'я, що робить її перспективним функціональним харчовим інгредієнтом.

На сьогодні БЦ використовується в харчовій промисловості у різних формах, приділяючи особливу увагу трьом основним аспектам:

Покращення текстури харчових продуктів – завдяки своїй структурі та здатності формувати стабільні гелі, плівки та матриці, БЦ допомагає регулювати консистенцію, еластичність та в'язкість продуктів.

Біоактивний носій – БЦ може слугувати платформою для доставлення пробіотиків, ферментів, антиоксидантів та інших функціональних компонентів, забезпечуючи контрольоване вивільнення активних речовин у харчовій матриці.

Упаковка та бар'єрні матеріали – завдяки високій механічній міцності, бар'єрним властивостям та нетоксичності, БЦ використовується для створення пакувальних матеріалів, що подовжують термін зберігання продуктів та забезпечують додатковий захист від впливу навколишнього середовища.

Таким чином, БЦ є багатофункціональним матеріалом, що поєднує властивості структурного підсилювача, носія біоактивних компонентів та перспективного екологічного пакувального матеріалу, що робить її важливим елементом інноваційних рішень у харчовій промисловості.

В останні роки спостерігається значне зростання попиту на натуральні та корисні для здоров'я харчові інгредієнти у всьому світі, що зумовлено зростаючою обізнаністю споживачів щодо безпеки харчових продуктів, сталого розвитку та високої поживної цінності. Серед різноманітних біополімерів особливу увагу привертає целюлоза завдяки широкому спектру застосувань у харчовій упаковці, створенні функціональних продуктів харчування та розробці біоактивних сполук, спрямованих на покращення здоров'я людини.

Особливої уваги заслуговує бактеріальна целюлоза — унікальна форма целюлози, яка стала центром досліджень у харчовій промисловості та вивченні функціональних властивостей харчових продуктів. Її видатні механічні властивості, чистота та біосумісність роблять її перспективним інгредієнтом для поліпшення текстури продуктів, доставки біоактивних речовин та розробки

інноваційних пакувальних матеріалів, що сприяють подовженню терміну зберігання та підвищенню якості харчових продуктів.

Бактеріальна целюлоза – це природний біоматеріал, який вирізняється унікальною структурою та багатофункціональними властивостями. Її надзвичайна механічна міцність, висока здатність утримувати воду та нановолокниста архітектура роблять бактеріальну целюлозу надзвичайно універсальною для застосування в харчовій промисловості, у пакуванні та як носій біоактивних сполук.

Окрім фізичних та функціональних характеристик, останні дослідження підкреслюють потенційні користі бактеріальної целюлози для здоров'я, включаючи підтримку шлунково-кишкового тракту, регулювання рівня глюкози в крові та прояви антиоксидантної активності. Завдяки цим властивостям бактеріальна целюлоза набуває значного потенціалу як цінний функціональний інгредієнт у харчових продуктах, що сприяє одночасно покращенню їхньої якості та користі для здоров'я споживачів.

Перше відкриття бактеріальної целюлози відноситься до 1886 року й приписується Адріану Брауну, який під час досліджень оцтовокислого бродіння спостерігав утворення гелеподібної плівки на поверхні середовища, що продукувалася ацетобактеріями. Браун зауважив, що плівка швидко розширювалася, покриваючи всю поверхню живильного середовища.

Бактерія Acetobacter xylinum (сучасна назва Komagataeibacter xylinus) відповідає за синтез бактеріальної целюлози. Біосинтез целюлозних волокон у цих бактерій відбувається через складний ферментативний процес у цитоплазмі та включає чотири ключові ферменти, що діють послідовно:

Глюкокіназа – каталізує перетворення глюкози на глюкозо-6-фосфат.

Глюкозо-6-фосфат ізомераза (глюкозофосфатмутаза) – перетворює глюкозо-6-фосфат на глюкозо-1-фосфат.

УДФ-глюкозо-пірофосфорилаза – каталізує перетворення глюкозо-1-фосфату на УДФ-глюкозу.

Целюлозосинтаза – здійснює полімеризацію УДФ-глюкози в довгі ланцюги целюлози, які формують нанонитки та плівкову структуру бактеріальної целюлози.

Цей процес забезпечує утворення чистої, високомолекулярної та висококристалічної целюлози з унікальними фізичними властивостями, які роблять її перспективним біоматеріалом у харчовій промисловості та суміжних галузях.

Бактеріальна целюлоза (БЦ) – це макромолекулярний полісахарид, що складається з β-D-глюкопіранозильних мономерів, з'єднаних β-1,4-глікозидними зв'язками. Одна бактеріальна клітина здатна полімеризувати до 200 000 залишків глюкози в ланцюг β-1,4-глюкану за секунду, при цьому внутрішньомолекулярні водневі зв'язки між сусідніми ланцюгами забезпечують структурну стабільність.

Бактеріальна целюлоза вважається найкращою формою природної целюлози, її ширина в 100–1000 разів менша за ширину бавовняної целюлози. Вона класифікується як стабільний нанорозмірний мережевий матеріал, що виділяється у вигляді смугастих фібрил діаметром менше 100 нм, включаючи нанофібрили розміром 2–4 нм. Чистота бактеріальної целюлози перевищує 95 %, вона не містить геміцелюлози, лігніну та пектину, що полегшує розділення та очищення.

Бактеріальна целюлоза може вироблятися шляхом ферментації на різних середовищах, що знижує виробничі витрати та скорочує цикли виробництва. Вона демонструє чудову гігроскопічність і здатність утримувати воду порівняно з целюлозою рослинного походження, а кристалічність БЦ перевищує 80 %, що значно вище за 40–60 % кристалічності рослинної целюлози. Завдяки покращеній хімічній доступності та реакційній здатності БЦ особливо придатна для хімічної модифікації, такої як алкілування, карбоксиметилювання, амінометилювання та прищеплена кополімеризація.

Бактеріальна целюлоза є повністю їстівною, біосумісною та біорозкладною, що робить її ідеальним матеріалом для використання як функціональний харчовий компонент (харчові волокна) у харчовій

промисловості. Переваги БЦ перед наноцелюлозою рослинного походження включають:

- ✓ унікальну тривимірну просторну мережеву структуру та плинність;
- ✓ високу кристалічність і полімеризацію в поєднанні з сильними гігроскопічними та гелеутворюючими властивостями;
- ✓ високу чистоту, нетоксичність та легку біорозкладність, що робить її придатною для низьковитратного великомасштабного промислового виробництва;
- ✓ чудову міцність на розрив та механічні властивості.

Завдяки цим властивостям бактеріальна целюлоза знаходить широке застосування в харчовій промисловості. Вона була визнана GRAS (Generally Recognized As Safe) Управлінням з контролю за продуктами харчування та лікарськими засобами США (FDA). У харчовій промисловості БЦ виконує роль джерела харчових волокон, харчової добавки та пакувального матеріалу.

Її широке застосування пояснюється унікальними властивостями:

- ✓ виробництво з використанням натуральних поживних середовищ для фруктових соків, надаючи целюлозі аромат і колір соку;
- ✓ високочиста форма натуральної целюлози, синтезованої мікроорганізмами, без потреби у жорсткій хімічній обробці;
- ✓ універсальність, здатність формуватися в плівки, гранули, квадрати, смужки, сфери та індивідуальні форми, що відповідають різним уподобанням споживачів;
- ✓ нанорозмірна 3D просторова структура, придатна для інноваційних застосувань у харчовій промисловості;
- ✓ можливість контролю виробництва шляхом регулювання синтезу штамів, що відкриває перспективи для передових харчових технологій, включно з 3D-друком харчових продуктів.

Таким чином, бактеріальна целюлоза є високофункціональним, безпечним і багатообіцяючим біоматеріалом для сучасної харчової промисловості.

14.7. Порошкоподібна целюлоза

У сучасних швидкозростаючих галузях промисловості спостерігається зростаючий попит на інгредієнти, що забезпечують багатофункціональні переваги. Одним із таких компонентів є порошкоподібна целюлоза, яка здобула постійне визнання як у харчовій, так і у фармацевтичній промисловості. Цей універсальний матеріал, часто відомий як мікроцелюлоза, відіграє ключову роль у підвищенні стабільності продуктів, поліпшенні текстури та загальної функціональної продуктивності кінцевих виробів.

Включення порошкоподібної целюлози до сучасних рецептур сприяло розвитку інноваційних застосувань, що вирішують проблеми якості, ефективності та тривалого зберігання продуктів. Завдяки активним дослідженням і розробкам у цій сфері, зростає глобальний інтерес до використання порошкоподібної целюлози в харчовій та фармацевтичній промисловості, що робить її критично важливим компонентом для виробників у різних регіонах світу.

Порошкоподібна целюлоза – це природний компонент, отриманий із рослинних волокон за допомогою контрольованих процесів рафінування та обробки, що забезпечують високу чистоту та однорідність матеріалу. Завдяки своїй функціональній універсальності, вона широко застосовується як у харчовій, так і у фармацевтичній промисловості, виконуючи роль сполучної речовини, наповнювача та стабілізатора. Порошкоподібна целюлоза підтримує однорідність текстури продуктів, сприяє стабільності сумішей і допомагає зберігати їхні властивості протягом усього терміну придатності.

Процес перетворення сирої целюлози на порошкоподібну форму дозволяє отримати дрібний, інертний та безпечний порошок, що відповідає суворим стандартам контролю якості. Така обробка поєднує природне походження матеріалу з передовими технологічними методами, створюючи продукт, який не лише відповідає вимогам охорони здоров’я та безпеки, а й зберігає всі необхідні експлуатаційні характеристики для промислового застосування.

Використання порошкоподібної целюлози у виробництві харчових продуктів демонструє її критичну роль у забезпеченні стабільності, текстури та якості кінцевого продукту. У харчовій промисловості цей інгредієнт допомагає підтримувати оптимальний баланс вологості та структури у широкому спектрі продуктів, таких як хлібобулочні вироби, молочні продукти, напої та десерти. Завдяки високій здатності поглинати вологу без зміни смакових характеристик, порошкоподібна целюлоза запобігає утворенню грудочок, покращує однорідність сумішей та підвищує приємність споживання продукту, забезпечуючи комфортне відчуття в роті.

Наукові дослідження також підкреслюють використання порошкоподібної целюлози для підвищення вмісту харчових волокон у продуктах та продовження їхнього терміну зберігання, одночасно зберігаючи поживну цінність та сенсорні властивості. Таким чином, виробники отримують можливість пропонувати споживачам продукти, які є одночасно привабливими, збалансованими за поживністю та сприяють формуванню здоровіших харчових звичок.

У фармацевтичній сфері порошкоподібна целюлоза відіграє незамінну роль завдяки своїм унікальним властивостям зв’язування та стисливості. Ці характеристики критично важливі для виробництва таблеток, де точність дозування, міцність та довговічність продукту є ключовими факторами. Дрібнодисперсний порошок забезпечує рівномірне розподілення активних інгредієнтів, контрольоване вивільнення та стабільність препарату протягом усього терміну придатності. Крім того, сумісність порошкоподібної целюлози з різними фармацевтичними активними речовинами робить її універсальним інгредієнтом для складних рецептур. Завдяки поєднанню функціональної ефективності та високого рівня безпеки для пацієнтів, порошкоподібна целюлоза продовжує залишатися предметом активного дослідження та широкого застосування у фармацевтичній промисловості.

14.7.1. Інноваційне використання порошкоподібної мікроцелюлози в промисловості

Еволюція порошкоподібної мікроцелюлози значно розширила її застосування на різних етапах виробництва як у харчовій, так і у фармацевтичній промисловості. Покращені фізико-хімічні властивості цього інгредієнта дозволяють виробникам отримувати високоякісні зв'язувальні речовини, що забезпечують структурну цілісність таблеток, капсул та інших фармацевтичних форм. У харчовій промисловості порошкоподібна мікроцелюлоза надає продуктам бажаної консистенції, полегшує контроль порцій, підтримує однорідну текстуру та стабільність без зміни смакових характеристик.

Завдяки своїй універсальності та здатності адаптуватися до різних технологічних умов, порошкоподібна мікроцелюлоза стає ключовим компонентом у виробництві продуктів різних структур та масштабів, забезпечуючи ефективність процесів і стабільність кінцевого продукту.

Порошкоподібна мікроцелюлоза сьогодні відіграє ключову роль у впровадженні інновацій у харчовій та фармацевтичній промисловості завдяки своїм багатофункціональним властивостям. Її унікальні характеристики — висока здатність до зв'язування, стабільність у процесі обробки, інертність та здатність контролювати вологість — дозволяють застосовувати її на різних етапах виробництва, що відкриває нові технологічні можливості.

У харчовій промисловості порошкоподібна мікроцелюлоза використовується для:

- ✓ Поліпшення текстури та стабільності хлібобулочних виробів, соусів, молочних продуктів і напоїв.
- ✓ Підвищення вмісту харчових волокон без зміни смакових характеристик продукту.
- ✓ Запобігання утворенню грудочок, покращення відчуття в роті та контроль порційності.
- ✓ Створення функціональних продуктів, адаптованих до сучасних вимог споживачів щодо здорового харчування.

Таблиця 29 – Інноваційне використання порошкоподібної мікроцелюлози в харчовій промисловості

Сфера застосування	**Функція порошкоподібної мікроцелюлози**	**Інноваційний ефект / Переваги**
Хлібобулочні вироби	Покращення текстури, зв'язування інгредієнтів	Стабільна структура, рівномірна пористість, покращене відчуття в роті
Молочні продукти	Контроль вологи, стабілізація емульсій	Запобігання відокремленню сироватки, однорідність, покращення терміну зберігання
Напої та соуси	Підтримка консистенції та однорідності	Попередження утворення осаду, покращене відчуття при споживанні
Функціональні продукти	Збільшення вмісту клітковини, контроль текстури	Підвищення поживної цінності без зміни смаку, створення продуктів для здорового харчування
Сухі суміші та порошкові продукти	Антизлежувальні та стабілізуючі властивості	Запобігання грудочкам, легке дозування, зручність при упаковці та споживанні
Кондитерські вироби	Регулювання вологи та текстури	Покращена пластичність, стабільна форма, оптимальна структура глазурі та кремів

Інноваційне використання порошкоподібної мікроцелюлози дозволяє поєднувати природні властивості целюлози з сучасними технологічними процесами, забезпечуючи ефективність, стабільність і високу якість кінцевих продуктів. Вона виступає як універсальний інгредієнт, здатний адаптуватися до різних рецептур та виробничих масштабів, що робить її незамінною у сучасній промисловості.

Контроль якості. Контроль якості має першорядне значення у виробництві порошкоподібної целюлози для харчової промисловості. Виробники дотримуються суворих міжнародних стандартів охорони здоров'я та безпеки, використовуючи передові технології для забезпечення чистоти продукту та запобігання забрудненню. Кожна партія інгредієнта проходить перевірку на відповідність фармацевтичним та харчовим критеріям, що гарантує стабільність та високу якість продукту. Постійне вдосконалення виробничих процесів забезпечує відповідність порошкової мікроцелюлози суворим нормативним вимогам і дозволяє застосовувати її у чутливих харчових продуктах.

Виробничі процеси. Сировина рослинного походження перетворюється на чистий порошок за контрольованих умов обробки. Для отримання однорідного продукту використовуються технології рафінування, сушіння та просіювання. Поєднання сучасних технологій із традиційними методами виробництва забезпечує стабільність, безпеку та високу функціональність порошкової целюлози у харчових продуктах.

Ринкові тенденції та інновації. Попит на високоякісні та функціональні харчові інгредієнти постійно зростає через підвищену увагу споживачів до безпеки харчових продуктів, ефективності та сталого розвитку. Порошкоподібна целюлоза використовується для оптимізації рецептури, покращення текстури, стабільності та терміну зберігання продуктів. Інновації в технологіях обробки та постійні наукові дослідження відкривають нові можливості для застосування цього інгредієнта. Використання порошкової целюлози сприяє впровадженню більш сталого підходу до виробництва, поєднуючи ефективність із екологічною відповідальністю.

14.8. Целюлозні аерогелі

Дефіцит викопних ресурсів та зростаючі екологічні проблеми спонукали дослідників, корпорації та уряди шукати економічно ефективні, біорозкладні та нетоксичні біополімери як стійкі альтернативи традиційним матеріалам. Аерогелі стали цінним класом матеріалів для заміни полімерів на основі нафти.

Серед різних біополімерів целюлоза завдяки своїй біосумісності, біорозкладності, відновлюваності та нетоксичності стала перспективним матеріалом для створення аерогелів. Целюлозні аерогелі, окрім традиційних властивостей целюлози, демонструють надлегку структуру, високий ступінь пористості та велику питому площу поверхні, що робить їх ідеальними кандидатами для різноманітних застосувань, таких як адсорбція, каталіз, звукоізоляція, доставка ліків, аерокосмічні матеріали та упаковка харчових продуктів.

Целюлозні аерогелі готують з різних джерел, включаючи лігноцелюлозну біомасу, бактерії та морські організми. Побічні продукти харчової промисловості, такі як стебла конопель, яблучний жом та мелена кава, стали недорогими та екологічно чистими матеріалами для виробництва целюлозних аерогелів. Використання цих відходів сприяє їхній утилізації та розвитку циркулярної біоекономіки, одночасно зменшуючи забруднення навколишнього середовища та приносячи економічні вигоди.

Незважаючи на наявність оглядових робіт про аерогелі з різних біополімерів, таких як крохмаль, хітозан, пектин та β-глюкан, кількість оглядів, присвячених целюлозним аерогелям з побічних продуктів харчової промисловості, залишається обмеженою. Тому в цьому огляді зосереджено увагу на синтезі целюлозних аерогелів з побічних продуктів харчової промисловості, їх ключових властивостях та потенційному застосуванні. Таке дослідження відкриває нові можливості перетворення відходів харчової промисловості на високоцінні продукти.

Аерогелі є одним із перспективних екологічно чистих матеріалів, які мають значний потенціал для вирішення сучасних проблем, пов'язаних із дефіцитом ресурсів та екологічною стійкістю. Згідно з Міжнародним союзом чистої та прикладної хімії (IUPAC), «аерогелі – це нерідинні мережі, що складаються з взаємопов'язаних колоїдних частинок як дисперсної фази в газі (зазвичай повітрі)».

Ці матеріали відзначаються високою пористістю та малою щільністю, а також винятковими фізико-хімічними властивостями. До їхніх характеристик належать низька теплопровідність (до 0,015 Вт $м^{-1}·К^{-1}$), низька щільність (до 1 $кг·м^{-3}$) та висока питома поверхня (до 1000 $м^2·г^{-1}$). Крім того, вони демонструють надзвичайні можливості масообміну завдяки когерентній пористій структурі з пористістю понад 95% і діаметром пор від 2 до 50 нм.

Проте точне визначення аерогелів залишається неоднозначним, оскільки їх фізико-хімічні властивості значно залежать від процесу виготовлення та обраного матеріалу. Сушіння надкритичним вуглекислим газом вважається

найкращим методом для збереження структури гелів і отримання високоякісних аерогелів.

Завдяки своїм унікальним фізико-хімічним характеристикам, аерогелі знайшли застосування в багатьох галузях, включаючи оптоелектроніку, звукоізоляцію, медичні матеріали, адсорбційний каталіз та аерокосмічні матеріали. Крім того, здатність органічних та неорганічних компонентів формувати композити відкриває нові можливості для створення інноваційних аерогелів із розширеним спектром застосувань.

Новаторське відкриття аерогелів було здійснене в 1931 році Стівеном Кістлером. Як матеріал-попередник він використав силікагель, а відповідний аерогель був отриманий методом надкритичного сушіння, що включав підвищення температури та застосування тиску понад критичну точку розчинника гелю.

На початку 1940-х років Стівен Кістлер підписав ліцензійну угоду з корпорацією Monsanto на виробництво силікагельного аерогелю, що призвело до тривалого комерційного успіху цієї продукції.

До 1942 року аерогель був офіційно представлений на ринку компанією Monsanto під брендом Santocel, заклавши основу для подальшого розвитку та комерціалізації аерогелів.

Ринок аерогелів має багатообіцяючий потенціал зростання завдяки їх різноманітним можливим застосуванням у промисловості, медицині, харчовій галузі та високотехнологічних матеріалах. Високопористі та легкі аерогелі з унікальними фізико-хімічними властивостями відкривають широкі можливості для інноваційних рішень.

Однак ринок аерогелів стикається з певними проблемами, головною з яких є високі виробничі витрати та дорога сировина. Це обмежує їх широке комерційне впровадження, особливо у масовому виробництві та споживчих товарах.

Дослідники активно зосереджують зусилля на оптимізації виробничих процесів, зменшенні витрат та розробці більш доступних і привабливих

аерогелевих продуктів для споживачів, щоб стимулювати розвиток ринку та підвищити економічну доцільність їх застосування.

Аерогелі в основному класифікуються на органічні та неорганічні залежно від прекурсора, який використовується для їх виготовлення.

Неорганічні аерогелі є найдавнішим і найпоширенішим типом. Вони формують пористі тривимірні мережі з властивостями, характерними для матеріалу. Найчастіше неорганічні аерогелі отримують з кремнезему, титану, графену та інших матеріалів і зазвичай використовуються для нехарчових застосувань. Аерогелі на основі кремнезему привертають увагу через високу пористість, низьку теплопровідність та прозорість, але вони крихкі і мають обмежений опір стисканню. Крім того, висока вартість їх синтезу обмежує комерційне використання.

З іншого боку, органічні аерогелі останнім часом стають предметом активних досліджень через їхню біорозкладність, нетоксичність та менший вплив на навколишнє середовище. Органічні аерогелі можуть бути як на основі вуглецю, так і на основі полімерів – синтетичних або біополімерів. Вуглецеві аерогелі, що отримуються з біологічних джерел шляхом піролізу або спалювання, формують пористу тривимірну мережу та застосовуються переважно як адсорбенти або електроди в електричних пристроях.

Синтетичні полімери, що використовуються для приготування аерогелів, включають меламін, резорцин, полівініловий спирт тощо. Біополімери включають вуглеводи, такі як полісахариди, та білки. Аерогелі на основі полісахаридів викликають особливий інтерес завдяки потенціалу замінити матеріали на основі нафти, сприяючи циркулярній біоекономіці. Ці полісахариди, включаючи целюлозу, крохмаль, альгінат та хітозан, можуть бути отримані з рослин, бактерій або водоростей.

Завдяки біологічному походженню, біорозкладності та можливості промислового виробництва у великих обсягах з низькою вартістю, аерогелі на основі полісахаридів стають ключовою сферою досліджень. Серед них целюлоза, найпоширеніший біополімер на Землі, є особливо перспективною

сировиною для приготування аерогелів. Целюлозні аерогелі відзначаються такими перевагами, як біосумісність, доступність джерела біомаси, біорозкладність, висока відновлюваність та висока міцність на стиск.

Целюлозні аерогелі стали багатофункціональними матеріалами, що застосовуються у теплоізоляції, біомедичних матеріалах, харчовій промисловості, адсорбції та багатьох інших галузях.

14.9. Особливості целюлозних аерогелів

14.9.1. Інновації в процесах екстракції целюлози

Целюлоза ***($C_6H_{10}O_5)_n$*** – це природний нерозгалужений біополімер, який утворюється з повторюваних D-глюкозних одиниць, сполучених β (1 → 4) глікозидними зв'язками. Вона є найпоширенішим полісахаридом на планеті та основним компонентом клітинних стінок рослин, де формує міцні мікрофібрилярні структури. Окрім рослин, целюлоза також зустрічається у водоростях, морських організмах і синтезується бактеріями. У своєму найчистішому вигляді целюлоза міститься в бавовні (близько 90%) та деревині (від 40% до 50%).

Вперше целюлозу ідентифікував французький хімік Ансельм Пайєн у 1838 році, давши їй назву «les cellules». Він виділив цей волокнистий матеріал із тканин деревних рослин, оброблених кислотами та аміаком, а пізніше перетворив на декстрозу за допомогою сірчаної кислоти. Пайєн встановив хімічну подібність целюлози до цукру та крохмалю і визначив її хімічну формулу. У 1920 році німецький хімік Герман Штаудінгер довів, що целюлоза є полімером, утвореним глюкозними одиницями, з'єднаними ковалентними зв'язками.

Целюлоза має ряд унікальних властивостей завдяки своїй структурі, включаючи хіральність, біорозкладність і пористість. Її численні гідроксильні групи формують щільну мережу водневих зв'язків, яка забезпечує внутрішньомолекулярну та міжмолекулярну стабільність. Ці функціональні

групи також визначають гідрофільність целюлози та дозволяють здійснювати різноманітні хімічні модифікації на її поверхні.

Волокна целюлози мають ієрархічну будову: елементарні фібрили агрегуються в мікрофібрили, а ті, у свою чергу, формують великі волокна. Структура складається з кристалічних і аморфних ділянок, що визначає її механічні та фізико-хімічні властивості.

Завдяки своїм унікальним характеристикам целюлоза широко застосовується у харчовій, целюлозно-паперовій, текстильній, фармацевтичній, косметичній та біомедичній промисловості. Вона служить не лише структурним компонентом, а й матеріалом для створення високофункціональних продуктів.

Лігноцелюлозна біомаса є основним джерелом для отримання целюлози і складається з різноманітних компонентів, включаючи целюлозу, геміцелюлозу, лігнін, пектин, білки та екстрактивні речовини. Вміст кожного компоненту варіюється залежно від джерела біомаси: зазвичай целюлоза становить 40–60%, геміцелюлоза – 20–40%, а лігнін – 10–24%.

До джерел лігноцелюлозної біомаси належить як деревна сировина (листяна та хвойна деревина), так і недеревна (бавовна, коноплі, кенаф, джут, льон). Значні запаси целюлози містяться також у залишках сільськогосподарських культур, таких як пшенична, кукурудзяна та рисова солома, а також у лушпинні, багасі та інших відходах агролісівництва.

Целюлозу можна одержувати і з побутових та промислових відходів, зокрема з макулатури, текстильних виробів, садових відходів, картону та харчових відходів. Крім того, цінним джерелом є харчові побічні продукти, такі як вичавки від виробництва фруктових соків та вина, а також дробина, що залишається після виробництва пива та віскі.

Екстракція целюлози з лігноцелюлозної біомаси передбачає відокремлення целюлози від складної матриці, де вона міцно пов’язана з лігніном та геміцелюлозою. Процес виділення целюлозного волокна зазвичай складається з трьох основних етапів: попереднього гідролізу або

кондиціонування біомаси, варіння або попередньої хімічної обробки, а також відбілювання.

На етапі кондиціонування біомаси проводять промивання, подрібнення, сушіння та просіювання. Це сприяє руйнуванню лігнінових структур та збільшує площу поверхні, що покращує ефективність хімічних, мікробних та ферментативних реакцій у наступних стадіях. Промивання може виконуватися вручну або механічно, після чого матеріал подрібнюють до приблизно 2 см і замочують у деіонізованій воді для розпушення лігніну та видалення водорозчинних компонентів. Після цього матеріал висушують, подрібнюють до порошкоподібного стану та просіюють для отримання часток певного розміру.

Кондиціонування біомаси доповнюється варінням або попередньою хімічною обробкою для розчинення лігніну та геміцелюлози, що дозволяє виділити чисту целюлозу. Для цього застосовуються різні методи, включаючи кислотне або лужне варіння, ультразвукову обробку, процес Organosolv, глибокі евтектичні розчинники або комбінації одного чи декількох підходів.

> **Процес Organosolv** є методом попередньої обробки лігноцелюлозної біомаси з використанням органічних розчинників, що сприяє ефективному розчиненню лігніну та геміцелюлози. Завдяки цьому підходу можливе отримання високоякісної целюлози та лігніну, які можуть бути використані у виробництві паперу, біопалива та хімічних продуктів. Процес дозволяє виділяти окремі фракції біомаси — целюлозу, лігнін і геміцелюлозу — у чистому вигляді, забезпечуючи при цьому отримання високоякісного безсірчаного лігніну, придатного для подальшого хімічного синтезу.

Лужна попередня обробка зазвичай проводиться при кімнатній температурі та атмосферному тиску із застосуванням лужних реагентів, таких як гідроксиди натрію, калію, кальцію або амонію. Метою цього є розчинення лігніну та геміцелюлози, причому гідроксид натрію (NaOH) вважається найефективнішим. Для підвищення ефективності процесу NaOH часто комбінують з іншими хімічними речовинами. Гідроксид-іон руйнує міжмолекулярні зв’язки ферулової кислоти між лігніном та геміцелюлозою, що спричиняє набухання целюлози, зменшення її кристалічності та ступеня

полімеризації, а також збільшення внутрішньої поверхні та доступності для ферментів.

У целюлозно-паперовій промисловості домінуючим лужним методом є крафт-варіння, яке передбачає обробку деревної біомаси при високих температурах (145–170 °C) і під тиском у розчині гідроксиду натрію та сульфіду натрію, відомому як «білий луг». Після цього проводять відбілювання за допомогою таких агентів, як перекис водню (H_2O_2), натрію хлорит ($NaClO_2$) або озон (O_3), для видалення залишкового лігніну та отримання чистої, білої целюлози.

Зазвичай відбілювання здійснюється шляхом нагрівання лужно оброблених волокон у розчині натрію хлориту в кислому середовищі, створеному NaOH та буфером оцтової кислоти, що призводить до генерації діоксиду хлору (ClO_2), який розкладає лігнін. Додавання H_2O_2 сприяє додатковому руйнуванню зв'язків лігнін–геміцелюлоза. Для повного видалення лігніну застосовують кілька циклів відбілювання, що забезпечує отримання білих волокон, що свідчить про успішне завершення процесу. Важливо зазначити, що відбілювання може значно впливати на фізичні властивості волокон, зокрема на їхню міцність та довговічність.

Очищену целюлозу можна додатково хімічно модифікувати та перетворювати на цінні продукти, наприклад біопластики. Вона здатна набувати різних форм — целюлозні гідрогелі, аерогелі, мембрани та волокнисті матеріали — що дозволяє максимально реалізувати її потенціал у різноманітних застосуваннях.

14.9.2. Властивості та класифікація целюлозних аерогелів

Целюлозні аерогелі — це високопористі матеріали з тривимірною взаємопов'язаною сіткою, отримані з целюлози, із пористістю в межах 84,0–99,9 %. Вони надзвичайно легкі, із щільністю від 0,0005 до 0,35 г·см$^{-3}$, та характеризуються великою питомою поверхнею (10–975 м^2/г), високою міцністю на стиск (5,2 кПа–16,67 МПа) і гідрофільністю. До їхніх ключових переваг

належать відновлюваність, біорозкладність, біосумісність, наявність значних природних ресурсів та низька вартість виробництва.

Вперше целюлозні аерогелі були синтезовані з віскози групою Оокуни в 1993 році, отримавши назву «пориста целюлоза». Це відкриття стало основою для швидкого розвитку досліджень у сфері целюлозних аерогелів і привернуло значну увагу завдяки їхньому широкому спектру застосувань.

Целюлозні аерогелі загалом можна поділити на чотири основні категорії: бактеріальні целюлозні аерогелі, наноцелюлозні аерогелі, аерогелі похідних целюлози та регенеровані целюлозні аерогелі. Ця класифікація базується на молекулярній структурі, хімічному складі та методах синтезу.

Бактеріальні целюлозні аерогелі отримують із бактеріальної целюлози, яка вирощується у статичних бактеріальних культурах. Після видалення бактерій та інших домішок матеріал висушують для отримання аерогелю. Такі аерогелі характеризуються високою чистотою, оскільки не містять лігніну, геміцелюлози та інших органічних домішок, а також мають високий ступінь кристалічності та полімеризації. До недоліків належать тривалий час обробки, низький вихід та висока вартість виробництва.

Аерогелі похідних целюлози синтезуються з хімічно модифікованої целюлози, наприклад карбоксиметилцелюлози, гідроксипропілметилцелюлози, триацетилцелюлози або ацетату целюлози. Заміс гідроксильних груп функціональними групами знижує здатність молекул до утворення водневих зв'язків, тому для успішного гелеутворення часто застосовують зшиваючі агенти.

Наноцелюлозні аерогелі виготовляють з наноцелюлозних волокон шляхом диспергування їх у воді за допомогою ультразвуку або механічних методів із подальшим сушінням. Вони демонструють низьку усадку (<7 %) та високий модуль стиску (до 5,93 МПа) завдяки високій кристалічності та оптимальному співвідношенню сторін. Проте такі аерогелі мають обмежену еластичність, низьку оптичну прозорість і високі виробничі витрати через значне споживання енергії та хімікатів.

Регенеровані целюлозні аерогелі привертають увагу завдяки простоті та економічності виробництва. Целюлоза I (наприклад, із бавовни) перетворюється на більш термодинамічно стабільну целюлозу II (регенеровану целюлозу) шляхом розчинення або мерсеризації, що дозволяє отримувати матеріал із бажаними фізико-хімічними властивостями.

> **Мерсеризація** — це обробка целюлозних матеріалів, здебільшого бавовняних ниток, що підвищує їх міцність і надає яскравого блиску. Цей процес рідше застосовують до лляних і конопляних ниток.

Приготування регенерованих целюлозних аерогелів включає кілька етапів: розчинення целюлози, регенерацію, заміну розчинника та сушіння. Проте цей процес є трудомістким, а коефіцієнт усадки часто перевищує 30 %.

Окрім класифікації за походженням, целюлозні аерогелі можна також поділити залежно від їхніх функціональних властивостей, наприклад на матеріали для адсорбції, теплоізоляції або біомедичних застосувань. Такий підхід дозволяє синтезувати аерогелі, орієнтовані на конкретні потреби та практичні застосування.

14.9.3. Синтез целюлозних аерогелів

Виготовлення целюлозних аерогелів подібне до традиційних методів отримання органічних або неорганічних аерогелів і зазвичай включає етапи гелеутворення, обміну розчинників та сушіння.

Спершу, залежно від джерела сировини, екстрагують целюлозні волокна, що здебільшого передбачає делігніфікацію. Цей етап підвищує доступність целюлози для її подальшого перетворення на аерогель. Після екстракції целюлозу розчиняють або диспергують, зруйновуючи внутрішньо- та міжмолекулярну водневу мережу. Додатково можливе подрібнення до наноцелюлози — целюлозних нанокристалів або нановолокон — для покращення дисперсії та властивостей кінцевого аерогелю.

Для розчинення целюлози застосовують різні системи розчинників:

Водні комплексоутворювачі: гідроксид міді амонію, гідроксид кадмію у водному розчині етилендіаміну, тартрат заліза в лужному водному розчині;

Лужні системи: водний гідроксид натрію, гідроксид літію;

Неводні системи: сечовина, тіосечовина, оксид цинку, N-метилморфолін-N-оксид та іонні рідини.

Похідні целюлози, отримані хімічною модифікацією (наприклад, карбоксиметилцелюлоза, гідроксипропілметилцелюлоза, триацетилцелюлоза, етилцелюлоза, ацетат целюлози), зазвичай легше розчиняються у воді або специфічних органічних розчинниках, таких як діоксан, ізопропанол, дихлорметан, ацетон, диметилацетамід або диметилформамід.

Після розчинення рідка фаза переходить у тверду гелеву фазу методом золь–гель, формуючи тривимірну пористу сітчасту структуру. Утворення гелю з суспензії целюлози відбувається через агломерацію полімерів або розділення фаз за допомогою фізичного та хімічного зшивання:

Фізичне зшивання забезпечується силами Ван-дер-Ваальса, водневими зв'язками, електростатичними взаємодіями та переплутаністю ланцюгів;

Хімічне зшивання передбачає утворення ковалентних зв'язків із застосуванням агентів, таких як епіхлоргідрин або N,N-метиленбісакриламід, що створює стабільну тривимірну мережу.

Швидкість гелеутворення залежить від концентрації целюлозного розчину та температури, що дозволяє контролювати пористість і механічні властивості кінцевого аерогелю.

Після формування целюлозних гелів вони проходять стадію заміни розчинника, метою якої є вилучення води із системи (у випадку гідрогелів) та її заміна розчинником із вищою розчинювальною здатністю або леткістю. Такий етап сприяє збереженню тривимірної сітчастої структури матеріалу та скорочує тривалість сушіння.

У разі використання етанолу для заміни розчинника отримані гелі називають алкгелями (алкогелями). Процес здійснюють поетапно: концентрацію органічного розчинника поступово підвищують від 0 до 100% (наприклад, 30, 50,

70 і 100%). Такий градієнт концентрацій дає змогу мінімізувати усадку зразків і запобігти руйнуванню їхньої структури.

Після завершення синтезу проводять стадію сушіння, яка є ключовим етапом одержання целюлозного аерогелю та полягає у видаленні рідини з гелевої матриці. Вибір способу сушіння істотно впливає на морфологію та пористу структуру целюлозних аерогелів.

Звичайне випаровувальне сушіння, як правило, спричиняє руйнування та розтріскування пористої сітки гелю внаслідок дії капілярного тиску, що виникає через викривлення межі поділу «повітря–рідина». Тому для збереження структури матеріалу застосовують спеціальні методи, зокрема надкритичне сушіння та ліофілізацію, які є найпоширенішими способами обробки сформованих гідрогелів.

Водночас у наукових дослідженнях частіше розглядають саме надкритичне сушіння, оскільки матеріали, отримані цим методом, традиційно відносять до аерогелів, на відміну від кріогелів, що утворюються в результаті ліофілізації.

> **Ліофілізація** — це метод висушування шляхом заморожування з подальшим видаленням вологи з харчових продуктів або інших матеріалів. Вона є процесом дегідратації, що забезпечує збереження початкових властивостей продукту, а також сприяє зменшенню його маси й об'єму, що полегшує транспортування та зберігання.

Процес надкритичного сушіння передбачає усунення меніска на межі «рідина–пара» з метою формування целюлозних аерогелів. У цьому методі вологий гель після стадії обміну розчинника поміщають у герметичну камеру високого тиску, де поступово підвищують температуру та тиск до досягнення розчинником критичної точки. У надкритичному стані зникає межа поділу між рідкою та газоподібною фазами, що запобігає виникненню поверхневого натягу і, відповідно, руйнуванню структури, забезпечуючи збереження тривимірної пористої сітки гелю.

Загалом синтез целюлозних аерогелів визначається низкою ключових параметрів, зокрема типом і концентрацією прекурсора, наявністю та вмістом поверхнево-активних речовин, видом і концентрацією каталізатора, значенням pH, температурним режимом і методом сушіння. Сукупність цих чинників впливає на щільність матеріалу, його пористість, характер міжмолекулярних взаємодій, кінетику гелеутворення та ступінь зшивання полімерної сітки, що є вирішальними під час формування аерогелів.

Властивості синтезованих аерогелів оцінюють за кількома групами показників:

- ❖ структурними (розмір і об'єм пор, питома площа поверхні);
- ❖ механічними (міцність на стиск, еластичність);
- ❖ теплофізичними (теплопровідність);
- ❖ функціональними (зокрема, адсорбційна здатність).

Саме поєднання цих характеристик визначає можливості практичного застосування целюлозних аерогелів.

14.9.4. Фактори, що впливають на властивості та структуру целюлозних аерогелів

На властивості та структуру целюлозних аерогелів значний вплив справляють різні фактори, зокрема вибір розчинника для розчинення та утворення гелю, а також метод сушіння. Система розчинників, обрана для розчинення целюлози, визначає просторову орієнтацію полімерних ланцюгів, що безпосередньо впливає на морфологію аерогелю.

Додатково на пористість і структурні характеристики матеріалу можуть впливати різні добавки, такі як краплі олії та поверхнево-активні речовини, введені перед гелеутворенням, а також застосування антирозчинників під час регенерації та сушіння целюлози.

Метод сушіння, а також швидкість заморожування під час ліофілізації, визначають формування пористої мережі. Наприклад, повільне і рівномірне заморожування призводить до утворення ізотропних пористих структур, тоді як спрямоване льодове шаблонування формує стільникові 2D-пори вздовж

напрямку заморожування. Крім того, надкритичне сушіння із застосуванням CO_2 ($SC\text{-}CO_2$) забезпечує аерогелі з більшою питомою площею поверхні порівняно з кріогелями, отриманими шляхом ліофілізації.

> **$SC\text{-}CO_2$** — це надкритичний вуглекислий газ, який перебуває в стані, що поєднує властивості рідини та газу при досягненні критичної температури та тиску. У цьому надкритичному стані $SC\text{-}CO_2$ є високоефективним розчинником, що застосовується для екстракції різних речовин, зокрема для очищення полімерів, отримання рослинних екстрактів, а також у енергетиці в циклі Брайтона.

У попередніх дослідженнях було показано, що целюлозні аерогелі, отримані з люпинової лушпиння, мають значно більшу питому площу поверхні (115 м²/г) порівняно з кріогелями (20 м²/г). Це пояснюється утворенням кристалів льоду під час заморожування, що негативно впливає на розподіл целюлозних волокон і зменшує площу поверхні. Тому надкритичне сушіння $SC\text{-}CO_2$ зазвичай вважається більш ефективним, оскільки дозволяє отримати аерогелі з високим об’ємом пор, великою пористістю та більшою питомою площею поверхні порівняно з ліофілізацією.

Крім того, структура аерогелю краще зберігається при сушінні $SC\text{-}CO_2$ завдяки його газорідинним властивостям, тоді як ліофілізація може пошкоджувати наноструктуровані гелі через зростання кристалів льоду та внутрішні напруження в порах, що призводить до руйнування матриці. Аерогелі, отримані за допомогою $SC\text{-}CO_2$, також демонструють вищу біоактивну ємність у порівнянні з ліофілізованими, що підтверджує перевагу цього методу в застосуваннях, таких як доставка лікарських препаратів.

Молекулярна маса целюлози також суттєво впливає на властивості аерогелів. Так, аерогелі з високомолекулярної целюлози мають більшу площу поверхні (197 м²/г проти 85 м²/г), більш щільну структуру, тонші нанофібрили та підвищену термостабільність порівняно з аерогелями, отриманими з низькомолекулярної целюлози. Дослідження також показали, що самоасоціаційна поведінка похідних целюлози впливає на формування міцних та

стабільних структур: наприклад, карбоксиметилцелюлоза формує більш стійкі аерогелі, ніж нефункціоналізована мікрокристалічна целюлоза. Це підкреслює, що параметри синтезу целюлозних аерогелів можна налаштовувати відповідно до конкретних вимог застосування. Повне розуміння взаємозв'язків між цими змінними є ключовим для оптимізації процесу синтезу та досягнення бажаних структурних і функціональних властивостей.

Фізико-хімічні характеристики та структура целюлозних аерогелів безпосередньо визначають їхню ефективність у різних сферах застосування. Наприклад, низька теплопровідність і великий об'єм пор роблять їх придатними для теплоізоляційних матеріалів, зокрема для холодильних систем. Велика площа поверхні, низька щільність і висока водопоглинальна здатність забезпечують ефективне очищення води та стічних вод завдяки численним активним центрам для поглинання забруднювачів. Висока механічна міцність і низька щільність аерогелів є важливими для пакування харчових продуктів. Таким чином, структуру аерогелю можна модифікувати, регулюючи такі фактори, як система розчинників та метод сушіння, щоб відповідати вимогам конкретних застосувань.

14.9.5. Целюлозні аерогелі з побічних продуктів харчової промисловості

Хоча целюлозні аерогелі можна синтезувати з різних джерел, побічні продукти харчової промисловості все частіше розглядають як цінну сировину завдяки їхньому потенціалу зменшувати харчові відходи, підвищувати стійкість виробництва та сприяти розвитку циркулярної економіки. Щороку утворюється велика кількість харчових відходів, таких як лушпиння, стручки, вичавки, меласа, шкаралупа та побічні продукти переробки олійних культур. Ці матеріали, багаті на білки, ліпіди, біоактивні сполуки, харчові волокна та мікроелементи, при недостатньому використанні залишаються невикористаними, але водночас привертають увагу науковців, політиків та фахівців галузі завдяки своєму потенціалу для перетворення на продукти з доданою вартістю.

Побічні продукти харчової промисловості відкривають перспективні можливості для виробництва стійких нанопористих матеріалів, зокрема целюлозних аерогелів. Використання таких побічних продуктів не лише зменшує обсяг відходів та навантаження на довкілля, але й створює економічну цінність. Основний підхід передбачає вилучення лігноцелюлозного компонента з цих відходів, який слугує попередником для синтезу целюлозного аерогелю.

Крім того, побічні продукти харчової промисловості, будучи недеревними джерелами целюлози, мають певні переваги порівняно з деревиною: вони потребують менших витрат, простіші в обробці та мають нижчі хімічні та енергетичні потреби, що частково пояснюється меншим вмістом лігніну. Водночас варіабельний склад різних побічних продуктів харчової промисловості може спричиняти нестабільний вихід целюлози та продуктивність аерогелю, що створює значні виклики для стандартизації процесу та масштабування виробництва.

Наприклад, в одному з досліджень було продемонстровано можливість перетворення відпрацьованої меленої кави та яблучних вичавок на високовартісні целюлозні аерогелі. Зазвичай ці побічні продукти утилізують шляхом захоронення на звалищах, що спричиняє екологічні проблеми. Лігноцелюлозну сировину переробляли на целюлозні аерогелі із застосуванням золь-гель методу з подальшим надкритичним сушінням SC-CO_2.

Отримані матеріали продемонстрували відмінні характеристики: питома площа поверхні становила 229 $м^2/г$ для аерогелів, синтезованих з кавових відходів, і 208 $м^2/г$ — для аерогелів з яблучних вичавок. Водночас аерогелі, отримані з яблучних вичавок (0,016 $г/см^3$), мали значно нижчу щільність порівняно з аерогелями з відпрацьованої кави (0,191 $г/см^3$).

Ці результати підкреслюють важливість вибору прекурсора, оскільки саме природа вихідної сировини суттєво впливає на формування структури та експлуатаційні властивості целюлозних аерогелів.

Аналогічно, у наукових роботах повідомляється про виготовлення целюлозних аерогелів із різноманітних рослинних відходів, зокрема з Arundo

donax, стебел конопель, шкірки помело, відходів Posidonia oceanica, виноградних стебел, ячменю та пшеничної соломи. Отримані аерогелі продемонстрували виражені функціональні властивості та широкий спектр застосувань, включаючи сорбцію, пакування харчових продуктів, очищення стічних вод, тепло- й звукоізоляцію, а також системи контрольованого вивільнення добрив.

Зокрема, в одному з досліджень показано використання целюлозного аерогелю з виноградних стебел для створення інтелектуальної упаковки м'яса. У поєднанні з кополімером Salep і антоціанами червоного винограду матеріал характеризувався малою масою, високопористою структурою та збільшеним середнім розміром пор. Такі аерогелі виконували функцію індикаторів свіжості фаршу, змінюючи колір залежно від кислотності або лужності середовища.

В іншому дослідженні целюлозні аерогелі, синтезовані з койрових волокон, продемонстрували значний потенціал для сорбційних застосувань, зокрема при ліквідації розливів рідин, видаленні барвників та теплоізоляції. Вони показали сорбційну здатність щодо води та олії на рівні 22 і 16 г/г відповідно, за щільності 0,0375 г/см³ та пористості 99,6%. Крім того, аерогелі продемонстрували високу адсорбційну здатність щодо метиленового синього — до 62 г/г, що майже у 100 разів перевищує показники багатьох інших природних адсорбентів.

Отже, наведені дослідження підтверджують можливість функціонального налаштування целюлозних аерогелів відповідно до вимог конкретних сфер застосування. Водночас питання їхньої відтворюваності та економічної доцільності потребують подальших досліджень і технологічного вдосконалення.

Крім того, у дослідженнях розглядали вплив різних методів попередньої обробки під час екстракції целюлози — зокрема лужної, розведеної кислотної та підкисленої гліцеринової — на властивості целюлозних аерогелів, отриманих із ячмінної соломи. Встановлено, що аерогель із волокон, які мали найвищий вміст целюлози (до 80% після підкисленої гліцеринової обробки), характеризувався найбільшою питомою площею поверхні (49,5 м²/г). Водночас аерогель із волокон

з найнижчим вмістом лігніну (близько 6% після лужної обробки) мав найменшу об'ємну масу (0,0274 г/см³) і надзвичайно високу пористість (98,17%).

Також було встановлено, що аерогелі з підвищеним вмістом геміцелюлози та більш розвиненою пористою структурою демонструють покращені показники адсорбції метиленового синього та ефективніше заповнення пор. Усі досліджені матеріали показали потенціал для застосування в очищенні нафтових розливів і видаленні барвників із водних середовищ.

Отримані результати підкреслюють важливу роль хімії попередньої обробки у контролі пористості та адсорбційної поведінки целюлозних аерогелів. Водночас такі методи часто пов'язані з підвищеними технологічними витратами, тому досягнення оптимального балансу між виходом целюлози, ефективністю попередньої обробки та економічною доцільністю процесу залишається ключовим завданням, що потребує подальших досліджень.

Різні побічні продукти харчової промисловості мають неоднаковий хімічний склад та морфологію волокон, що суттєво впливає на вихід целюлози, властивості отриманих аерогелів та можливість їх масштабного виробництва. Зокрема, встановлено, що кукурудзяні качани містять більше целюлози, ніж рисова солома, листя чи шкірка ананаса, що зумовлено відмінностями у хімічному складі цих побічних продуктів.

Також відзначаються значні коливання щільності аерогелів залежно від джерела целюлози. Наприклад, аерогелі, отримані з яблучних вичавок, мають нижчу щільність (близько 0,016 г/см³), ніж аерогелі з меленої кави (приблизно 0,19 г/см³), що пояснюється різними фізико-хімічними характеристиками відповідних біомасових прекурсорів.

Харчові побічні продукти є доступним, економічно вигідним і сталим джерелом для синтезу целюлозних аерогелів, проте дослідження, спрямовані на визначення оптимальної сировини для масштабованого виробництва, залишаються обмеженими. Масштабованість технології залежить від кількох факторів: доступності та природи прекурсора, особливостей виробничого процесу, а також типу та кількості застосовуваних хімікатів.

Зокрема, показано перспективність використання відходів цукрової тростини як сировини для промислового виробництва наноцелюлозних аерогелів завдяки їх широкій доступності та придатності до масштабування. Отже, подальші дослідження мають оцінити взаємозв'язок між продуктивністю аерогелю та виробничими витратами, що є ключовим для ефективного впровадження цих матеріалів у промисловість.

14.9.6. Екологічні та економічні переваги використання побічних продуктів харчової промисловості для виробництва целюлозних аерогелів

Використання побічних продуктів харчової промисловості для синтезу целюлозних аерогелів у різних сферах застосування є сталим підходом, який дозволяє зменшити негативний вплив на довкілля, підвищити ефективність використання ресурсів і знизити витрати на утилізацію відходів. Такий підхід дає змогу перетворювати побічні продукти переробки на високоцінні матеріали, придатні для різноманітних застосувань.

Утилізація харчових відходів сприяє зменшенню викидів парникових газів, покращенню екосистемних послуг та підтримці політики сталого управління ресурсами. Екологічна ефективність виробництва високовартісних матеріалів із побічних продуктів харчової промисловості значною мірою залежить від обраного технологічного процесу.

Тому важливо проводити оцінку життєвого циклу та техноекономічний аналіз, щоб розробити комплексний і сталий підхід до переробки таких відходів. Особлива увага має приділятися хімічним реагентам, що застосовуються для екстракції целюлози, з точки зору їх безпечності, ефективності та впливу на навколишнє середовище.

Побічні продукти харчової промисловості часто є недорогими та легко доступними, що робить їх економічно вигідною сировиною для синтезу аерогелів та придатною для масштабного виробництва. Крім того, перетворення таких відходів на високовартісні матеріали відкриває нові ринкові можливості та сприяє створенню робочих місць у регіонах із розвиненою сільськогосподарською та харчовою переробною промисловістю.

Інтеграція валоризації побічних продуктів у існуючі виробничі ланцюги підтримує більш сталий та надійний економічний розвиток. Водночас економічна ефективність цього підходу значною мірою залежить від оптимізації виробничого процесу, якості отриманих матеріалів та сфер їх застосування.

Побічні продукти харчової промисловості містять не лише целюлозу, а й геміцелюлозу та лігнін, які зазвичай видаляються під час процесу екстракції целюлози. Використання цих недостатньо задіяних біополімерів дозволяє додатково підвищити екологічну та економічну стійкість процесу, сприяючи реалізації принципів циркулярної економіки. Наприклад, відходи лігніну можна перетворювати на біопаливо або біоенергію, а також використовувати для виробництва біопластиків, композитів та хімічних продуктів, таких як феноли, альдегіди, ксиліт і сахариди. Геміцелюлозу, яка часто залишається недостатньо використаною, можна фракціонувати та модифікувати для конкретних цільових застосувань, включаючи водочутливі матеріали, пребіотичні олігосахариди, активну харчову упаковку та біомедичні пристрої. Такий підхід відкриває можливості для створення функціональних матеріалів із побічних продуктів харчової промисловості, підвищуючи їх цінність і багатофункціональність.

Разом із тим, існує низка критичних бар'єрів для масштабного виробництва целюлозних аерогелів. Зокрема, синтез аерогелів зазвичай включає енергоємні та витратні методи обробки, зокрема сушіння, що робить виробничий процес трудомістким і підвищує експлуатаційні витрати, обмежуючи можливість промислового впровадження. Додаткові проблеми пов'язані з варіаціями у складі, якості та кількості побічних продуктів, їх доступністю, яка залежить від географічного регіону та змін клімату, а також із регуляторними вимогами. Такі невідповідності можуть призводити до різниці властивостей аерогелів від партії до партії, що негативно впливає на відтворюваність і стабільність продукту. Для подолання цих проблем необхідно впроваджувати економічно ефективні та енергоощадні методи обробки, стандартизувати процедури попередньої обробки сировини та розробляти надійні стратегії контролю якості.

Сучасні дослідження зосереджуються на оптимізації процесів синтезу целюлозних аерогелів із метою зменшення енергоспоживання, підвищення масштабованості технології та мінімізації впливу на навколишнє середовище та економіку. Особливу увагу приділяють надкритичному сушінню за допомогою CO2 (SC-CO2), яке є основним методом сушіння целюлозних аерогелів. Оптимізація цього процесу передбачає скорочення часу сушіння, зниження споживання енергії та CO2, а також покращення масообміну і повторне використання розчинника. Наприклад, одне дослідження показало, що підтримання числа Біо вище 65 у межах питомого тиску (9–17 МПа) та температури (313–323 К) прискорює сушіння, зменшує витрати розчинника та забезпечує ефективний режим з обмеженою дифузією, що підвищує продуктивність та стабільність отриманих аерогелів.

> **Число Біо (Bi)** — це безрозмірне характеристичне число, яке використовується як критерій подібності стаціонарного теплообміну між нагрітим або охолодженим твердим тілом і навколишнім середовищем. Воно назване на честь французького фізика Жан-Батиста Біо (Jean-Baptiste Biot).

В іншому дослідженні було запропоновано стратегію використання пінопластового шаблону для забезпечення сушіння наноцелюлозних аерогелів при атмосферному тиску, що представляє собою недорогу та структурно міцну альтернативу традиційним методам сушіння. Крім того, для значного зниження виробничих витрат на аерогелі та одночасного підвищення функціональних властивостей матеріалу було рекомендовано застосування безперервного виробництва та інтегрованої обробки, поєднаної з альтернативними технологіями, такими як 3D-друк. Ці досягнення підкреслюють високий потенціал для створення стійких і економічно вигідних целюлозних аерогелів із використанням побічних продуктів харчової промисловості, що, у свою чергу, сприяє їх широкому впровадженню у промислових масштабах.

Екологічні проблеми, спричинені використанням викопних ресурсів для задоволення потреб зростаючого населення, стимулювали інтерес до розробки

недорогих, стійких та біорозкладних матеріалів. У цьому контексті целюлозні аерогелі набувають все більшого значення завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям і демонструють перспективне застосування в різних галузях, включаючи адсорбенти нафти, очищення стічних вод, доставку лікарських засобів та упаковку харчових продуктів.

Хоча існує широкий спектр джерел для виробництва целюлозних аерогелів, використання побічних продуктів харчової промисловості представляє сталий підхід до створення високоцінних матеріалів, що відповідає принципам циркулярної біоекономіки. Перетворення цих побічних продуктів на целюлозні аерогелі не лише зменшує обсяг відходів і забруднення навколишнього середовища, а й сприяє економічній стійкості виробництва.

Незважаючи на досягнутий прогрес, оптимізація процесу виробництва целюлозних аерогелів залишається складною через варіабельний лігноцелюлозний склад побічних продуктів харчової промисловості. Для подолання цих труднощів майбутні дослідження повинні зосереджуватися на стандартизації методів обробки сировини, що дозволить підвищити масштабованість виробництва та забезпечити узгодженість властивостей матеріалу між партіями. Це може включати розробку енергоефективних та екологічно чистих технологій виробництва, зокрема із застосуванням «зелених» розчинників.

Методи сушіння, такі як надкритичне сушіння SC-CO2, сублімаційне сушіння та сушіння при атмосферному тиску, також потребують оптимізації для зменшення енергоспоживання, скорочення часу сушіння та зниження загальних виробничих витрат. Додатково перспективним є дослідження гібридних методів сушіння, що дозволяє підвищити стійкість і економічну доцільність виробництва целюлозних аерогелів.

Майбутні дослідження повинні приділяти увагу також використанню інших біополімерних компонентів побічних продуктів, таких як лігнін і геміцелюлоза, що залишаються після екстракції целюлози. Їхнє ефективне

залучення дозволить зробити процес більш стійким та відповідним принципам циркулярної біоекономіки.

Крім того, важливо проводити комплексну оцінку життєвого циклу та техноекономічний аналіз процесу виробництва целюлозних аерогелів. Це допоможе краще зрозуміти переваги та обмеження переробки харчових побічних продуктів і сприятиме прийняттю обґрунтованих рішень щодо вибору розчинників, оптимізації технологічних процесів і мінімізації екологічного та економічного навантаження. Порівняльний аналіз виробництва целюлозних аерогелів із харчових відходів і традиційної сировини на основі життєвого циклу та техноекономіки може дати цінні дані щодо доцільності масштабного промислового впровадження цих матеріалів.

Зосередження на цих ключових аспектах дозволить підвищити масштабованість, економічну ефективність і екологічну стійкість целюлозних аерогелів з побічних продуктів харчової промисловості, відкриваючи шлях до їх комерційного впровадження та широкого промислового застосування.

14.10. Емульсії на основі целюлози

В останні роки емульсії на основі целюлози привертають значну увагу у харчовій промисловості завдяки своїм багатофункціональним властивостям. Вони сприяють покращенню текстури продуктів, підвищенню смакових якостей, захисту поживних речовин та подовженню терміну їх придатності. Емульсійні системи, створені з використанням целюлози та її похідних у ролі емульгаторів та стабілізаторів, демонструють високу стабільність, нетоксичність і видатну адаптивність до різних умов застосування.

Емульсії, які належать до класу дисперсних систем, зазвичай складаються з однієї рідини, диспергованої у вигляді крапель в іншій, незмішуваній рідині. У таких системах дисперсна фаза відповідає внутрішній фазі, тоді як безперервна фаза формує зовнішню середу. В останні роки емульсії привернули значну увагу у харчовій промисловості завдяки своїм багатофункціональним властивостям,

що включають покращення текстури продуктів, посилення смакових якостей, захист поживних речовин та подовження терміну придатності.

З огляду на зростаючий попит споживачів на здорові продукти з низьким вмістом жиру, емульсії все частіше застосовуються як замінники жиру у відповідних харчових продуктах. Протягом процесу емульгування для стабілізації системи використовуються різні емульгатори та стабілізатори, включаючи поверхнево-активні речовини та наночастинки, залежно від типу емульсії. Водночас, через проблеми екологічної стійкості та безпеки харчових продуктів, зростає інтерес до використання натуральних та екологічно чистих емульгаторів і стабілізаторів, що стало важливим напрямком сучасних досліджень у харчовій промисловості.

Стійкі матеріали все частіше замінюють традиційні синтетичні емульгатори через зростаючу стурбованість щодо їхнього впливу на здоров'я та навколишнє середовище. Природні емульгатори, такі як білки, полісахариди та системи на основі частинок, набувають популярності як ефективні та безпечні альтернативи. Серед них целюлоза – широко поширений, екологічно чистий та легко модифікований природний біоматеріал – останнім часом привернула значну увагу дослідників і знайшла широке застосування у харчовій промисловості.

Завдяки низькій вартості, безпечності, екологічності та широкій доступності, целюлозні матеріали є перспективною альтернативою традиційним поверхнево-активним речовинам у ролі стабілізаторів емульсій. Використання целюлози та її похідних у якості емульгаторів та стабілізаторів сприяє підвищенню стабільності емульсій, забезпечуючи при цьому високу біосумісність, біорозкладність, їстівність та можливість контрольованого вивільнення активних речовин. Ці властивості відкривають широкі перспективи для їх застосування в харчовій промисловості.

Крім того, очікується, що розвиток емульсій на основі целюлози стимулюватиме інновації у створенні функціональних харчових продуктів,

вирішуючи ключові проблеми, пов’язані з довгостроковою стабільністю систем та їх функціоналізацією.

14.9.1. Методи приготування емульсій на основі целюлози

В останні роки емульсії на основі целюлози привертають значну увагу завдяки своїй універсальності та екологічності. Для приготування таких емульсій застосовуються різні форми целюлози, включаючи мікрокристалічну целюлозу, наноцелюлозу та її похідні. Кожен тип целюлози здатний стабілізувати різні види емульсій, такі як «олія у воді» (O/W) та «вода в олії» (W/O), формуючи стабільні міжфазні шари та забезпечуючи надійність емульсійної системи. Різноманітність емульсій на основі целюлози відкриває широкі можливості для їх застосування в харчовій промисловості.

Вибір методу емульгування має вирішальне значення для формування якісних емульсій на основі целюлози. Низькоенергетичні методи зазвичай забезпечують менш однорідний розподіл розмірів частинок та нижчу стабільність, тоді як високоенергетичні методи емульгування сприяють кращій диспергованості целюлози та отриманню стабільних емульсій, що наразі є переважним підходом у виробництві.

Емульсії зазвичай містять три основні компоненти: водну фазу, олійну фазу та емульгатор. Такі системи є термодинамічно нестабільними, і їхня стабільність залежить від численних факторів, включаючи властивості поверхні та концентрацію стабілізуючих частинок, метод емульгування, умови навколишнього середовища та величину міжфазного натягу олія–вода. З часом механічна цілісність міжфазної плівки може погіршуватися, що впливає на довгострокову стабільність емульсії.

Використання целюлози та її похідних як емульгаторів і стабілізаторів забезпечує чудову біосумісність, нетоксичність, екологічність та біорозкладність. Завдяки цим властивостям емульсії на основі целюлози знайшли широке застосування у харчовій промисловості. Основні напрямки використання включають розробку функціональної упаковки, консервацію

харчових продуктів, покращення текстури та сенсорних властивостей, заміну тваринних жирів, доставку поживно активних речовин, а також пригнічення патогенних мікроорганізмів.

Таким чином, завдяки своїй доступності, різноманіттю форм та винятковим властивостям, целюлоза та її похідні є перспективними природними стабілізаторами та емульгаторами, що забезпечують стабільність емульсій та відповідають сучасним екологічним і функціональним вимогам харчової промисловості.

14.11. Нанокристали целюлози

Нанокристали целюлози отримують із целюлози – найпоширенішого природного полімеру на Землі, який входить до складу клітинних стінок рослин. Виробництво нанокристалів целюлози здійснюється шляхом кислотного гідролізу целюлозних волокон, при якому видаляються аморфні ділянки целюлози, залишаючи висококристалічні сегменти.

Нанокристали целюлози вирізняються кількома унікальними властивостями, що роблять їх перспективними для різноманітних застосувань. До них належать біорозкладність, велика питома площа поверхні та високі механічні характеристики. Розміри цих наночастинок зазвичай коливаються від 5 до 500 нанометрів у довжину та від 5 до 70 нанометрів у ширину, залежно від джерела целюлози та умов гідролізу.

Окрім фізико-механічних властивостей, нанокристали целюлози демонструють антимікробну активність, зумовлену наявністю сульфатних груп, що утворюються під час кислотного гідролізу. Ці групи здатні пригнічувати ріст певних патогенних мікроорганізмів на поверхні харчових продуктів, що сприяє зменшенню псування та скороченню харчових відходів.

Історично целюлоза та її похідні застосовувалися в харчовій промисловості переважно як загусники, стабілізатори та емульгатори. Проте з розвитком нанотехнологій увага дослідників змістилася на потенціал целюлози на нанорівні, зокрема на нанокристали целюлози. Нещодавні досягнення у

технології виробництва нанокристалів целюлози, зокрема впровадження більш ефективних та екологічно чистих методів, відкрили нові можливості для їх застосування у виробництві та упаковці харчових продуктів.

Очікується, що нанокристали целюлози відіграватимуть ключову роль у розробці інноваційних харчових продуктів і екологічно безпечних пакувальних рішень, сприяючи зменшенню впливу харчової промисловості на навколишнє середовище. Завдяки своїм унікальним властивостям, нанокристали целюлози отримують все більше визнання та застосування для покращення різних характеристик харчових продуктів, таких як текстура, стабільність та тривалість терміну придатності.

Таблиця 30 – Застосування нанокристалів целюлози у харчовій промисловості

Сфера застосування	**Функція нанокристалів целюлози**	**Переваги**	**Приклади продуктів**
Стабілізація емульсій	Формування міцних міжфазних плівок у системах «олія у воді» (O/W) та «вода в олії» (W/O)	Покращення текстури продуктів, стабільність емульсій, заміна синтетичних емульгаторів, зменшення жирової складової	Соуси, майонези, заправки, креми
Покращення упаковки	Зміцнення біопластикових плівок, підвищення бар'єрних властивостей	Зменшення проникності для газів і вологи, подовження терміну придатності продуктів	Плівки для фруктів, овочів, м'ясних продуктів, біопакування напоїв
Контрольоване вивільнення поживних речовин	Створення матриці для вітамінів, антиоксидантів, пробіотиків	Функціональні харчові продукти з покращеним поживним профілем, підвищена біодоступність	Енергетичні батончики, йогурти, напої, функціональні харчові добавки
Антимікробна дія	Взаємодія з патогенними мікроорганізмами на поверхні продуктів	Зменшення псування продуктів, продовження свіжості, підвищення безпеки харчових продуктів	Фрукти, овочі, готові до вживання салати, м'ясо, риба

Сфера застосування	Функція нанокристалів целюлози	Переваги	Приклади продуктів
Загусники та стабілізатори	Підвищення в’язкості та стабільності рідких і напіврідких продуктів	Покращення текстури, збереження однорідності продукту, безпечна альтернатива синтетичним загусникам	Десерти, пудинги, супи, напої
Функціональна упаковка	Інтеграція НКЦ у плівки з антимікробними або бар’єрними властивостями	Підвищення екологічності упаковки, зменшення харчових відходів	Біопакування для свіжих продуктів, упаковка молочних продуктів

Нанокристали целюлози демонструють широкий спектр застосувань у харчовій промисловості, включаючи поліпшення текстури, стабільності та терміну придатності продуктів, а також забезпечення функціональних властивостей, таких як антимікробний захист та контрольоване вивільнення поживних речовин. Використання різних типів целюлози, зокрема мікрокристалічної, наноцелюлози та її похідних, дозволяє налаштовувати властивості нанокристалів під конкретні вимоги продуктів: напої, десерти, емульсії, упаковка та харчові покриття. Мікрокристалічна целюлоза забезпечує структурну стабільність та загущення, тоді як наноцелюлоза підвищує механічну міцність емульсій та антимікробні властивості. Похідні целюлози, такі як карбоксиметилцелюлоза, сприяють гелеутворенню та контрольованому вивільненню активних речовин. Правильний вибір типу целюлози дозволяє оптимізувати функціональні та технологічні властивості харчових продуктів, забезпечуючи їх стабільність, безпечність та підвищену споживчу цінність.

14.11.1. Нанокристали целюлози в упаковці харчових продуктів

Застосування нанокристалів целюлози у пакувальних матеріалах для харчових продуктів стає одним із ключових напрямів розвитку стійкої упаковки, оскільки ці наночастинки забезпечують синергію між функціональністю, безпекою продуктів та екологічною відповідальністю виробництва. Використання нанокристалів дозволяє створювати пакувальні матеріали, які не

тільки зберігають продукт від пошкоджень, але й активно сприяють подовженню терміну його зберігання, зменшенню харчових втрат та зниженню впливу на навколишнє середовище.

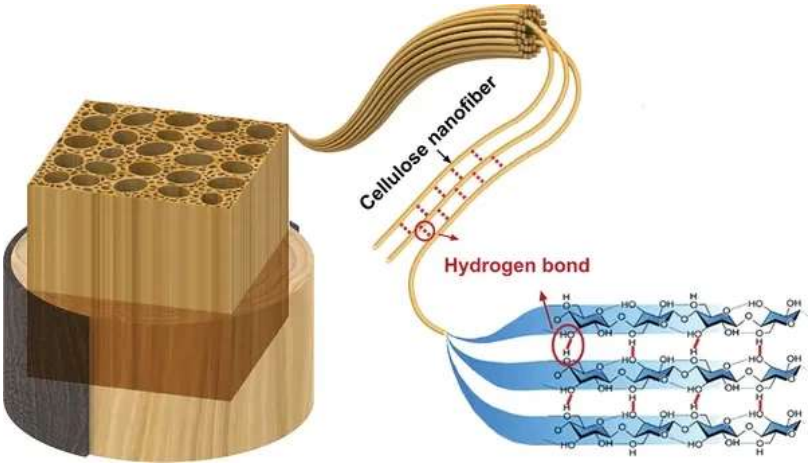


Рис. 48. Нанофібри целюлози та водневі зв’язки в структурі волокна [47]

Бар'єрні властивості. Однією з найважливіших характеристик пакування є здатність перешкоджати проникненню кисню, водяної пари, жирів та летких ароматичних речовин. Нанокристали целюлози, інтегровані у біополімерні плівки або композити, створюють щільну, компактну і тривимірну мережу, яка суттєво зменшує дифузію газів і вологи через матеріал. Це забезпечує не тільки збереження смакових і ароматичних властивостей харчових продуктів, але й зменшує окислювальні процеси та розвиток мікроорганізмів, що призводять до псування продуктів.

Механічна міцність та структурна стабільність. Нанокристали целюлози володіють високою механічною міцністю та жорсткістю. Включення їх у структуру пакувальних матеріалів підвищує стійкість до розтягування, розривів і проколів. Це дозволяє виробляти тонші плівки без шкоди для цілісності упаковки, що призводить до економії сировини та зменшення маси

упаковки. Зниження витрат матеріалів зменшує утворення пакувальних відходів, роблячи продукт більш екологічним.

Біорозкладність та екологічна безпека. Оскільки нанокристали целюлози виробляються з природних джерел, вони є біорозкладними та відновлюваними. Їх використання в пакувальних матеріалах для харчових продуктів сприяє зменшенню пластикових відходів і впливу упаковки на довкілля, одночасно відповідаючи принципам циркулярної економіки та глобальним стандартам сталого розвитку.

Функціональне покращення та інтеграція інновацій. Нанокристали целюлози дозволяють інтегрувати у пакувальні матеріали додаткові функції, включаючи контроль вологості, підвищену термостійкість та антимікробні властивості. Наприклад, пакування з нанокристалами целюлози може використовуватися для зберігання свіжих фруктів і овочів, м'яса, молочних продуктів та напоїв, забезпечуючи контрольований газообмін і зниження росту бактерій. Крім того, можливе створення інтелектуальної упаковки, яка змінює колір при псуванні продукту, сигналізуючи споживачу про стан свіжості харчового продукту.



Рис. 49. Зразки целюлозної упаковки для харчових продуктів [47]

Економічні та технологічні переваги. Використання нанокристалів целюлози сприяє зменшенню витрат на упаковку, оскільки підвищення міцності дозволяє застосовувати меншу кількість матеріалу. Крім того, покращення бар'єрних властивостей може зменшити потребу в додаткових консервантах і

стабілізаторах, що підвищує безпеку продукту та робить його більш привабливим для споживача.

У підсумку, інтеграція нанокристалів целюлози у пакувальні матеріали поєднує механічну міцність, покращені бар'єрні властивості, біорозкладність та можливості функціоналізації. Це забезпечує не лише ефективне зберігання та підвищену якість продуктів харчування, а й підтримує сталий розвиток харчової промисловості, сприяючи зниженню відходів, зменшенню негативного впливу на довкілля та впровадженню інноваційних рішень у сфері упаковки.

14.11.2. Нанокристали целюлози у системах доставки їжі

Завдяки своїй високій біосумісності, нетоксичності та винятковим механічним властивостям, нанокристали целюлози набули великої уваги в харчовій та функціональній біотехнології як перспективний матеріал для створення систем доставки харчових компонентів. Ці системи розроблені для інкапсуляції, захисту та контрольованого вивільнення біоактивних сполук, таких як вітаміни, ароматизатори, поліфеноли, антиоксиданти та пробіотики. Використання нанокристалів целюлози у таких системах дозволяє не лише підвищити безпеку та стабільність харчових продуктів, а й збільшити термін їх зберігання, зберегти смакові та сенсорні властивості, а також покращити харчову цінність кінцевого продукту.

Інкапсуляція біоактивних сполук. Нанокристали целюлози є ефективним носієм для інкапсуляції різних біологічно активних компонентів завдяки своїй здатності формувати наноструктури з великою поверхнею та високою адсорбційною здатністю. Інкапсуляція біоактивних сполук у нанокристалах целюлози забезпечує їх захист від негативного впливу зовнішніх факторів — таких як кисень, світло, підвищена вологість, а також агресивні умови травного тракту, які можуть призводити до деградації цих сполук. Крім того, нанокристали целюлози дозволяють реалізувати контрольоване або цільове вивільнення поживних речовин, що підвищує їхню біодоступність і зменшує втрати під час процесів травлення. Це особливо актуально для продуктів

функціонального харчування та дієтичних добавок, де ефективність доставки активних компонентів є критичною.

Покращення текстури та стабільності харчових продуктів. Нанокристали целюлози володіють унікальними реологічними властивостями, що робить їх ефективними природними стабілізаторами та загусниками для різних харчових систем. Вони можуть значно підвищувати в'язкість рідких та напіврідких продуктів, таких як йогурти, соуси, смузі, десерти та безалкогольні напої. Використання нанокристалів целюлози допомагає запобігати синерезису — відділенню води від продукту, підтримувати однорідну структуру та покращувати сенсорні властивості, такі як кремоподібність, гладкість і приємний об'ємний вигляд. Завдяки цьому споживач отримує продукт із стабільною консистенцією та привабливим зовнішнім виглядом, що важливо для комерційного виробництва.

Підвищення харчової цінності та функціональності продуктів. Однією з важливих переваг нанокристалів целюлози є їх здатність збагачувати харчові продукти поживними речовинами без істотної зміни смакових властивостей або зовнішнього вигляду. Наприклад, нанокристали целюлози можна застосовувати для доставки водорозчинних або жиророзчинних вітамінів, мінералів, омега-3 жирних кислот та антиоксидантів у прозорих напоях, молочних продуктах, хлібі або кондитерських виробах. Такий підхід дозволяє підвищувати харчову цінність продуктів, зберігаючи їх природний смак, аромат та текстуру. Крім того, нанокристали целюлози можуть використовуватися у створенні «розумних» харчових упаковок, які взаємодіють з продуктом для контролю свіжості або поступового вивільнення активних речовин, відкриваючи нові перспективи для інновацій у харчовій промисловості.

Таким чином, нанокристали целюлози є багатообіцяючим матеріалом для сучасних систем доставки харчових компонентів, забезпечуючи одночасно захист, контрольоване вивільнення, покращення текстури та підвищення функціональної цінності продуктів. Їх застосування відкриває нові можливості у створенні високоякісних, безпечних і функціональних харчових продуктів, що

відповідають сучасним вимогам споживачів до здорового харчування та інноваційних технологій.

14.11.3. Нанокристали целюлози як харчова добавка

Регуляторний статус нанокристалів целюлози як харчової добавки варіюється залежно від країни, проте загалом вони визнаються безпечними для використання. Зокрема, Управління з контролю за продуктами харчування та лікарськими засобами США (FDA) віднесло нанокристали целюлози до категорії GRAS (Generally Recognized as Safe), за умови використання відповідно до належної виробничої практики. Як харчова добавка, нанокристали целюлози забезпечують функціональні переваги, серед яких модифікація текстури, покращення стабільності емульсій і піни, а також підвищення в'язкості та міцності гелевих структур у харчових продуктах. Це пояснюється їхньою великою площею поверхні та здатністю формувати перколяційну сітку, яка стабілізує структуру продукту.

Приклади використання нанокристалів целюлози у харчовій промисловості вже демонструють їх ефективність. Так, у майонезі з низьким вмістом жиру вони виступають стабілізатором, що дозволяє зберігати кремоподібну консистенцію без додаткових жирових компонентів. У безглютеновому хлібі нанокристали целюлози покращують текстуру, об'єм і пористість, надаючи виробу приємну м'якість та зручну для споживання структуру.

Целюлоза є поширеним природним полімером, який можна отримувати з широкого спектра джерел. Це можуть бути рослинні матеріали в їх первозданному стані, такі як стебла, листя, насіння та плоди, або вторинні ресурси — відходи виробництва, які зазвичай утилізуються і можуть становити екологічну загрозу. Окрім рослин, целюлозу можна видобувати з мікроорганізмів, тваринних джерел, грибів, а також із природних смол, камедей і воску. Використання цих матеріалів для отримання нанокристалів целюлози

дозволяє не лише створювати цінні функціональні інгредієнти, але й переоцінювати відходи, зменшуючи навантаження на навколишнє середовище.

Назва «наноцелюлоза» підкреслює нанометровий розмір цього природного полімеру, який надає матеріалу унікальні фізико-хімічні та механічні властивості. Існують три основні типи наноцелюлози, класифіковані залежно від способу виробництва та екстракції:

Кристалоподібна наноцелюлоза (CNC) — характеризується високим ступенем кристалічності, короткими жорсткими волокнами та здатністю підвищувати міцність композитних матеріалів.

Наноцелюлозні волокна (CNF) — волокнисті структури з високою довжиною та гнучкістю, що дозволяє формувати гелі, плівки та стабільні суспензії.

Бактеріальна наноцелюлоза (BNC) — синтезована спеціальними бактеріями, відзначається надзвичайною чистотою, високою водоутримуваною здатністю та чудовими механічними властивостями.

Створення нових матеріалів на основі наноцелюлози стає дедалі перспективною галуззю розвитку, оскільки ці наноматеріали поєднують стійкість, біорозкладність, нетоксичність та економічну ефективність виробництва. Їх застосування охоплює широкий спектр промислових галузей: від паперової, харчової та електронної промисловості до фармацевтики, біомедичної інженерії, будівництва та пакування.

Таким чином, нанокристали целюлози представляють собою універсальний природний матеріал, здатний одночасно вирішувати технологічні та екологічні завдання, відкриваючи нові можливості для створення безпечних, функціональних та інноваційних продуктів.

Хоча багато галузей промисловості виробляють відходи, харчова промисловість належить до секторів з найбільшим впливом на навколишнє середовище через масштаби виробництва та різноманітність виготовлених продуктів. Тому пошук ефективного використання побічних продуктів у цій

галузі є складним завданням, проте надзвичайно важливим для досягнення сталого розвитку.

Яскравим прикладом є виробництво текіли в мексиканському штаті Халіско. У процесі виготовлення напою утворюється велика кількість побічного продукту – багаси. Це тверда волокниста маса, що залишається після подрібнення ананаса агави та виділення ферментованих цукрів. За оцінками, обсяг багаси становить приблизно 40% від загальної маси сировини у вологому стані.

Висока доступність багаси раніше створювала серйозні проблеми для промисловості, оскільки її утилізація пов’язана з великими витратами. Більшість відходів потрапляла на нелегальні звалища, що призводило до забруднення ґрунтів фільтратом і створювало фітосанітарні ризики. Таке неконтрольоване розповсюдження органічних залишків негативно впливає на родючість земель і екологічну безпеку.

Водночас багаса агави має значний потенціал для повторного використання завдяки своєму складу: приблизно 44,5% целюлози, 25,3% геміцелюлози та 20,1% лігніну. Це дозволяє застосовувати її у виробництві біополімерів, компостів, кормів для тварин, біопалива та армуючих матеріалів. Останнім часом її активно досліджують як сировину для отримання нановолокон та нанокристалів целюлози, що відкриває нові перспективи для високотехнологічних та екологічно безпечних матеріалів.

Подібна ситуація спостерігається у Бразилії, де економіка багатьох регіонів значною мірою залежить від сільського господарства. Виробництво серцевини персикової пальми з пальм Bactris gasipaes (пупунья) призводить до утворення великої кількості залишків, оскільки для харчових продуктів використовується лише близько 10% маси дерева, а решта зазвичай йде на енергетичні або сільськогосподарські потреби.

Бразилія є провідним виробником і споживачем пальміто, і за даними 2017 року обсяг відходів становив приблизно 5×10^6 тон целюлози. Значна частина цієї сировини залишалася на полях або спалювалася, хоча могла бути

використана для створення більш цінних і прибуткових продуктів, таких як наноцелюлоза, біополімери та композитні матеріали.

Таким чином, повторне використання харчових відходів, таких як багаса агави та залишки пальми, не лише зменшує негативний вплив на довкілля, а й створює економічні можливості для фермерів і малих підприємств, сприяючи сталому розвитку та інтеграції біоекономіки у харчову промисловість.

14.11.4. Наноцелюлоза в продуктах харчування

Наноматеріали набувають дедалі більшого значення в харчовій промисловості завдяки їх здатності покращувати якість, функціональність та безпеку харчових продуктів. Вони можуть запобігати мікробному розкладанню упакованих продуктів, продовжувати термін їхнього зберігання, а також покращувати колір, смак, текстуру та стабільність. Крім того, наноматеріали здатні підвищувати біодоступність і засвоюваність вітамінів, мінералів та інших біологічно активних сполук.

У харчових продуктах наноматеріали можна умовно поділити на три основні групи:

Органічні наноматеріали – включають ліпіди, білки та полісахариди, які застосовуються для інкапсуляції біоактивних сполук, таких як вітаміни, антиоксиданти, барвники, ароматизатори та консерванти. Вони здатні формувати різноманітні наноструктури, наприклад міцели, ліпосоми, наносфери, що дозволяє забезпечити стабільність, контрольоване вивільнення і підвищену біодоступність активних компонентів в організмі людини.

Комбіновані органічні/неорганічні наноматеріали (поверхнево-функціоналізовані) – поєднують властивості органічних та неорганічних компонентів. Їх вводять у харчові матриці для додання продукту специфічних функцій, наприклад антимікробної дії, антиоксидантної активності, регуляції проникності, в’язкості та стабільності емульсій.

Неорганічні наноматеріали – це, здебільшого, метали та їх оксиди, такі як Ag, Fe, Se, TiO_2, які використовуються як харчові добавки або у складі

упаковки для підвищення безпеки продукту, тривалості зберігання та запобігання окисленню і мікробному псуванню.

Одним із яскравих прикладів застосування наноматеріалів у харчовій промисловості є авокадо, один із найпоширеніших фруктів у Мексиці, яка є найбільшим його експортером у світі. Олія авокадо завдяки своєму складу жирних кислот відповідає сучасним рекомендаціям щодо здорового харчування та зменшення споживання насичених жирів. Дієти, багаті на олію авокадо, довели ефективність у зниженні загального холестерину, холестерину ліпопротеїнів низької щільності та тригліцеридів плазми, порівняно з дієтами, що містять кукурудзяну, соєву або соняшникову олію. Емульсії на основі олії авокадо використовуються як харчова добавка або заправка, оскільки вони є більш корисними та поживними порівняно з іншими жировими альтернативами. Пошук методів для підвищення стабільності та терміну придатності таких емульсій залишається актуальним завданням у харчовій індустрії.

Одним із перспективних підходів для покращення фізико-хімічних та функціональних властивостей емульсій є використання целюлозних нановолокон. Їх можна застосовувати трьома основними способами: як харчову добавку, у складі пакувальних матеріалів або як компонент емульгаторів. Целюлозні нановолокна здатні стабілізувати структуру емульсій, зменшувати коалесценцію, запобігати утворенню крему на поверхні та підвищувати стійкість до температурних змін. Їхня дія порівнянна з ефектом класичних емульгаторів, таких як сорбітан моностеарат або Span 60, проте з додатковою перевагою – натуральним і біорозкладним походженням.

Наприклад, у дослідженнях стабілізації емульсій авокадової олії було використано целюлозні нановолокна, отримані з промислових відходів пальміто (Bactris gasipaes) у Бразилії. Ці наноструктури дозволили значно підвищити стабільність емульсій, усунути явище коалесценції, запобігти утворенню крему на поверхні та забезпечити стійкість навіть після охолодження. Встановлено, що зі збільшенням вмісту целюлозних нановолокон зменшувався розмір частинок

міцел, що безпосередньо впливало на кінцеву стабільність та однорідність системи.

Таким чином, застосування наноматеріалів у харчовій промисловості, особливо целюлозних нановолокон, поєднує технологічні переваги, підвищення харчової цінності та екологічну стійкість. Використання побічних продуктів сільськогосподарського та харчового виробництва для отримання наноматеріалів, таких як нановолокна, відкриває нові можливості для створення функціональних, безпечних і тривалих у зберіганні харчових продуктів, сприяючи розвитку біоекономіки та сталого виробництва.

Основні функції наноцелюлози в харчових продуктах:

Стабілізація та загущення. Наноцелюлоза ефективно стабілізує емульсії, суспензії та пінні системи. Вона підвищує в'язкість продуктів і запобігає розшаруванню, коалесценції або синерезису. Завдяки цьому її використовують у йогуртах, соусах, майонезі, безглютеновому хлібі та напоях для покращення текстури та стабільності.

Інкапсуляція біоактивних речовин. Наноцелюлоза може інкапсулювати вітаміни, пробіотики, ароматизатори та антиоксиданти. Вона захищає ці компоненти від впливу кисню, світла, температури та вологи, що запобігає їх деградації. Крім того, контрольоване вивільнення під час травлення підвищує біодоступність поживних речовин.

Покращення харчової цінності. Наноцелюлозу можна використовувати для збагачення продуктів харчовими компонентами без зміни смаку, кольору або прозорості. Наприклад, її додають до напоїв, молочних продуктів або випічки разом із вітамінами та мінералами.

Застосування в емульсіях на основі олій. Наноцелюлоза може замінювати або доповнювати традиційні емульгатори. Дослідження показали, що додавання целюлозних нановолокон у емульсії олії авокадо усуває коалесценцію, запобігає утворенню крему на поверхні та підвищує стабільність системи навіть після охолодження. Розмір частинок міцел зменшується зі збільшенням концентрації

нановолокон, що безпосередньо покращує кінцеву текстуру та стійкість продукту.

Наноцелюлоза здатна формувати міцні, легкі та біорозкладні плівки. Такі пакувальні матеріали можуть підвищувати термін зберігання харчових продуктів, запобігати проникненню кисню та мікробів і одночасно зменшувати використання пластику.

Джерела наноцелюлози у харчовій промисловості

Відходи агропромисловості: наприклад, багаса агави, що утворюється при виробництві текіли, містить близько 44,5% целюлози і підходить для отримання нановолокон.

Лігноцелюлозні залишки сільськогосподарських культур: серцевина персикової пальми (Bactris gasipaes) – джерело наноцелюлози, отриманої з відходів виробництва пальміто.

Бактеріальна наноцелюлоза: отримується за допомогою спеціальних мікроорганізмів і використовується для створення стабільних гелів та плівок.

Переваги використання наноцелюлози

Біосумісність та безпека: наноцелюлоза нетоксична та вважається безпечною для харчового застосування.

Покращення текстури та стабільності продуктів: підвищує в'язкість, зменшує розшарування та синерезис.

Підвищення харчової цінності: дозволяє інкапсулювати і зберігати біоактивні сполуки.

Сталий розвиток: використання відходів агропромисловості для отримання наноцелюлози зменшує екологічне навантаження та створює додаткові економічні можливості.

Наноцелюлоза є перспективним інгредієнтом для харчової промисловості, здатним підвищувати безпеку, стабільність та функціональні властивості продуктів. Її застосування дозволяє створювати інноваційні продукти з підвищеною харчовою цінністю та одночасно сприяє сталому використанню ресурсів і зменшенню харчових відходів. Використання наноцелюлози в

емульсіях, загущувачах, упаковці та біоактивних добавках відкриває нові перспективи для розвитку сучасної харчової індустрії та біоекономіки.

14.11.5. Наноцелюлоза як армуючий матеріал

Використання целюлози як армуючого матеріалу для синтетичних полімерів та перероблених пластикових матеріалів привертає значну увагу у науково-дослідній та промисловій сферах. Застосування наноцелюлози у складі полімерних композитів дозволяє значно покращувати механічні та фізико-хімічні властивості матеріалів. Багато досліджень присвячено вивченню біокомпозитів, отриманих шляхом змішування синтетичних полімерів із целюлозними волокнами або нановолокнами.

Доведено, що додавання наноцелюлози до синтетичних полімерів підвищує міцність на розрив, жорсткість, теплопровідність та термостійкість матеріалів. Проте ефективність підсилення залежить від характеристик вихідної целюлози, включаючи її морфологію, розмір частинок та ступінь кристалічності.

Особливо перспективними є дослідження, де наноцелюлоза використовується для армування біорозкладних полімерів, таких як полімолочна кислота (PLA). Виявлено, що біокомпозити на основі PLA та наноцелюлози демонструють механічні та термічні властивості, порівнянні з традиційними нафтовими полімерними матеріалами. При цьому поєднання полімерної матриці та армуючих нановолокон дозволяє отримати екологічно безпечні матеріали, які є біорозкладними та можуть бути схвалені для прямого контакту з харчовими продуктами.

Таким чином, використання наноцелюлози у складі полімерних матеріалів відкриває широкі перспективи для створення стійких, міцних та безпечних композитів, що можуть замінювати традиційні пластикові матеріали та сприяти розвитку циркулярної економіки в харчовій та пакувальній промисловості.

Питання для самоконтролю

1. За якими основними критеріями проводиться класифікація целюлози?
2. Що таке модифіковані форми целюлози?
3. Якими властивостями характеризується целюлоза та її похідні?
4. Що розуміють під дифібріляцією целюлози?
5. Якими специфічними властивостями відзначається бактеріальна целюлоза?
6. Як наноцелюлоза та її похідні у вигляді нанокомпозитів застосовуються на практиці?
7. Яку функцію виконує целюлоза у складі гідрогелів?
8. Які технологічні операції необхідні для екстракції целюлози?
9. Як створюють пакувальні матеріали для харчових продуктів на основі наноцелюлози?
10. Які інноваційні технології виникли завдяки застосуванню порошкоподібної целюлози у продуктах?
11. Завдяки яким властивостям целюлозні аерогелі користуються високим попитом?
12. Чому лігноцелюлозна біомаса вважається ефективним джерелом для екстракції целюлози?
13. Які фактори визначають властивості та структуру целюлозних аерогелів?
14. Що таке сушіння за методом SC-CO_2?
15. Які вторинні матеріали можна застосовувати при виробництві целюлозних аерогелів?
16. Які процеси харчової промисловості сприяють зменшенню викидів парникових газів?
17. Чи можуть целюлозні аерогелі впливати на стан навколишнього середовища?
18. Завдяки яким властивостям практично застосовують емульсії на основі целюлози?

19. Які методи використовують для приготування емульсій на основі целюлози?

20. Якими унікальними характеристиками володіють нанокристали целюлози?

21. З якою метою нанокристали целюлози застосовують у харчовій упаковці?

22. Завдяки яким властивостям нанокристали целюлози використовують у системах доставки харчових компонентів?

23. Як наноцелюлоза використовується безпосередньо в харчових продуктах?

Рекомендована навчальна література

1. Приходько Ю. М. Технологія целюлози : навч. посіб. / Ю. М. Приходько, В. В. Кононенко. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. 256 с.

2. Глушко О. В. Хімія і фізика високомолекулярних сполук : навч. посіб. / О. В. Глушко. Київ : Кондор, 2018. 312 с.

3. Технологія комплексного використання рослинної сировини : підручник / за ред. Г. І. Черниша. Суми : СумДУ, 2019. 420 с.

4. Малишев В. В. Нанотехнології та наноматеріали : навч. посіб. / В. В. Малишев. Київ : НУХТ, 2018. 320 с.

5. Біополімерні матеріали для пакування харчових продуктів : навч. посіб. / В. М. Пасічний та ін. Київ : НУХТ, 2021. 215 с.

6. Семенченко М. В. Органосольвентні методи варіння целюлози : монографія / М. В. Семенченко. Дніпро : Журфонд, 2020. 158 с.

7. Cellulose Science and Technology / ed. by T. Rosenau, A. Potthast, J. Hell. Wiley, 2018. 450 p.

8. Handbook of Nanocellulose and Cellulose Nanocomposites / ed. by H. Kargarzadeh et al. Wiley-VCH, 2017. 920 p.

Розділ 15. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІСАХАРИДІВ ТВАРИННОГО ПОХОДЖЕННЯ

15.1. Види та класифікація полісахаридів тваринного походження

Полісахариди тваринного походження – це високомолекулярні біополімери, які утворюються у живих організмах тварин і виконують різноманітні структурні, енергетичні та функціональні ролі. Вони є складовою частиною метаболічних та структурних систем організму і мають важливе значення для підтримання гомеостазу, механічної стабільності тканин та захисних процесів. До основних представників цієї групи належать глікоген, хітин, а також похідні глікозаміногліканів, такі як хондроїтин сульфат, гіалуронова кислота, кератан сульфат та інші.

Глікоген є головною формою запасання вуглеводів у печінці та м'язах тварин і служить швидким джерелом енергії при підвищеному енергетичному навантаженні. Він складається з розгалужених ланцюгів глюкози, що дозволяє швидко мобілізувати глюкозу у кровотік при потребі організму. Глікоген також використовується в біотехнології та харчовій промисловості для синтезу біоактивних сполук та як модельний полісахарид для дослідження ферментативних процесів та метаболізму вуглеводів.

Хітин – це структурний полісахарид, що входить до складу зовнішнього скелета членистоногих (комах, панцерних тварин) та клітинних стінок грибів. Хітин складається з повторюваних N-ацетил-D-глюкозамінових залишків і характеризується високою механічною міцністю, біосумісністю та здатністю до утворення гелів. На його основі виробляють хітозан, який широко використовується у харчовій промисловості як загущувач, стабілізатор та харчова добавка, у фармацевтиці для створення біоактивних препаратів, у медицині – для швів, пов'язок, систем доставки ліків та у виробництві біоплівок і біоматеріалів.

Глікозаміноглікани (ГАГ) – це складні неполімерні полісахариди, що складаються з повторюваних дисахаридних одиниць, які містять аміновані та

сульфатовані моносахариди. Найбільш відомими є хондроїтин сульфат, гіалуронова кислота, кератан сульфат та гепаран сульфат. Вони є ключовими компонентами позаклітинного матриксу тваринних тканин, виконуючи такі функції: підтримка еластичності та пружності тканин, гідратація та регуляція водного балансу в міжклітинному просторі, захист та змащування суглобів, участь у регуляції клітинної проліферації, міграції та загоєння ран.

У харчовій промисловості глікозаміноглікани застосовують як функціональні інгредієнти у продуктах для підтримки здоров'я суглобів, для створення гелеподібних текстур і стабілізації емульсій. У фармацевтиці вони використовуються як основа для виробництва ліків проти артриту, косметичних засобів для догляду за шкірою та систем доставки лікарських засобів.

Фізико-хімічні властивості тваринних полісахаридів роблять їх особливо цінними для інноваційних технологій:

Гідратаційна здатність та формування гелів – дозволяють використовувати їх у продуктах функціонального харчування, наприклад, у спортивних напоях та дієтичних добавках.

Біосумісність і біорозкладність – відкриває можливості для застосування у біоматеріалах, медичних імплантатах та системах доставки ліків.

Механічна міцність та структурна стабільність – важлива для створення біоплівок, упаковки харчових продуктів та гелевих текстур.

Біологічна активність – стимулює імунну систему, має протизапальні та антиоксидантні властивості, сприяє регенерації тканин.

Застосування полісахаридів тваринного походження охоплює широке коло галузей:

Харчова промисловість – загущувачі, стабілізатори, гелеутворювачі, функціональні добавки.

Фармацевтика – ліки для суглобів, антиоксиданти, системи доставки активних речовин.

Медицина та біотехнологія – шовні матеріали, пов'язки, тканинні інженерні структури, біоплівки.

Косметична промисловість – засоби для зволоження та підтримки пружності шкіри.

Вивчення та модифікація полісахаридів тваринного походження сприяють створенню інноваційних технологій – від розробки нових харчових продуктів з підвищеною функціональною цінністю до високоефективних біоматеріалів та систем доставки ліків. Сучасні методи хімічної, фізичної та ферментативної модифікації дозволяють коригувати їхню розчинність, в'язкість, здатність до утворення гелів та біологічну активність, що відкриває нові перспективи для біотехнологій, фармацевтики, косметики та харчових інновацій.

Таким чином, полісахариди тваринного походження – це не лише об'єкт фундаментальних досліджень у біохімії та фізіології, а й важливий ресурс для створення продуктів та технологій, що підвищують якість життя людини, підтримують здоров'я та забезпечують стійкий розвиток харчової та медичної промисловості.

Таблиця 31 – Види полісахаридів тваринного походження

Назва полісахариду	**Джерело**	**Структура**	**Основні функції**	**Сфери застосування**
Глікоген	Печінка та м'язи тварин	Розгалужений полімер глюкози, α-(1→4)-зв'язки основного ланцюга та α-(1→6)-зв'язки розгалужень	Запас енергії, швидке джерело глюкози	Біотехнологія, харчова промисловість, медична та спортивна нутриція
Хітин	Зовнішній скелет членистоногих, панцирі панцерних тварин, клітинні стінки грибів	Полімер N-ацетил-D-глюкозаміну, β-(1→4)-зв'язки	Механічна підтримка, структурна міцність, захист організму	Харчові добавки, хітозан (медицина, косметика, біоплівки, біоматеріали)
Хондроїтин сульфат	Сполучна тканина, хрящі, кістки	Повторювані дисахаридні одиниці з сульфатованими галактозаміновими залишками	Еластичність хрящів, змащування суглобів, структурна підтримка тканин	Фармацевтика (ліки для суглобів), косметика, біомедичні матеріали
Гіалуронова кислота	Шкіра, сполучна тканина,	Повторювані дисахариди глюкуронової кислоти	Гідратація тканин, загоєння ран,	Косметика, ортопедія, системи доставки

Назва полісахариду	Джерело	Структура	Основні функції	Сфери застосування
	склоподібне тіло ока	та N-ацетилглюкозаміну	підтримка еластичності шкіри	ліків, хірургічні матеріали
Кератан сульфат	Рогівка ока, хрящі	Сульфатовані повторювані дисахариди ксилозо- та галактозамінового типу	Підтримка прозорості рогівки, структурна стабільність тканин	Медичні та косметичні продукти, біоматеріали
Гепаран сульфат	Позаклітинний матрикс, поверхня клітин	Полісахарид із сульфатованими гексозаміновими та глюкуроновими залишками	Регуляція клітинного росту, коагуляція, імунна відповідь	Фармацевтика, тканинна інженерія, біотехнології

Полісахариди тваринного походження можна класифікувати за різними ознаками, зокрема за функціональним призначенням, хімічною структурою та фізико-хімічними властивостями. Така класифікація допомагає зрозуміти їх біологічну роль, механізм дії та сфери застосування у харчовій, фармацевтичній та медичній промисловості.

За функціональним призначенням полісахариди поділяють на три основні групи. Резервні полісахариди, до яких належить глікоген, виконують роль запасу енергії в печінці та м’язах тварин і забезпечують швидке джерело глюкози при підвищеному енергетичному навантаженні. Структурні полісахариди, такі як хітин, формують зовнішній скелет членистоногих та клітинні стінки грибів, забезпечуючи механічну міцність і захист організму. Нарешті, функціональні або біоактивні полісахариди, до яких належать глікозаміноглікани (хондроїтин сульфат, гіалуронова кислота, кератан сульфат та гепаран сульфат), виконують регуляторні, зволожувальні та захисні функції у тканинах, підтримують еластичність, гідратацію та функціонування суглобів.

За хімічною структурою полісахариди тваринного походження поділяються на глюкозні полімери, амінополісахариди та сульфатовані та несульфатовані глікозаміноглікани. Глюкозні полімери, представлені

глікогеном, мають розгалужену структуру з α-(1→4) і α-(1→6)-зв'язками. Амінополісахариди, як хітин, складаються з повторюваних N-ацетилглюкозамінових залишків і забезпечують механічну міцність. Глікозаміноглікани представлені різними сульфатованими та несульфатованими формами, наприклад, хондроїтин сульфат і гіалуронова кислота, які виконують біологічно активні та структурні функції.

За фізико-хімічними властивостями полісахариди тваринного походження можна розділити на ті, що утворюють гелі та здатні до високої гідратації (глікозаміноглікани та гіалуронова кислота), та ті, що забезпечують механічну міцність і стабільність структури (хітин). Глікоген, у свою чергу, характеризується високою розчинністю у воді та здатністю швидко мобілізуватися як джерело енергії.

Загальна класифікація полісахаридів тваринного походження дозволяє не лише систематизувати знання про їхні властивості та функції, а й обрати оптимальні джерела та технології для їх виробництва, модифікації та застосування у харчовій, фармацевтичній, косметичній та медичній промисловості.

15.2. Технологічні особливості виробництва полісахаридів тваринного походження

Полісахариди тваринного походження є важливими біополімерами, що широко застосовуються у харчовій промисловості завдяки їхнім функціонально-технологічним властивостям — гелеутворенню, стабілізації, емульгуванню, вологоутриманню та текстуруванню. До найважливіших представників цієї групи належать хітин і хітозан панцерних тварин, глікозаміноглікани сполучної тканини (гіалуронова кислота, хондроїтинсульфати), гепарин, а також деякі структурні полісахаридно-білкові комплекси тваринної сировини. Сучасні інноваційні технології їх виробництва спрямовані на підвищення виходу цільового продукту, збереження біологічної активності, екологізацію процесів та розширення можливостей використання у функціональних харчових продуктах.

Сировинною базою для отримання полісахаридів є відходи харчової промисловості: панцирі креветок і крабів, рибні кістки, шкіра, хрящі, сполучна тканина м'ясної сировини. Інноваційний підхід передбачає комплексну переробку вторинних ресурсів, що дозволяє реалізувати принципи безвідходного виробництва та циркулярної біоекономіки. Використання таких ресурсів не лише знижує собівартість продукції, а й мінімізує екологічне навантаження.

Одним із ключових напрямів є біотехнологічні методи екстракції, що замінюють традиційні агресивні хімічні способи. Ферментативна обробка (протеази, хітинази, колагенази) забезпечує селективне виділення полісахаридів без їх руйнування. Такі методи дозволяють отримувати продукти з високою молекулярною масою, контрольованим ступенем деацетилювання (для хітозану) та стабільними функціональними характеристиками, що особливо важливо для харчових систем.

Інноваційні фізико-хімічні технології включають застосування ультразвукової, мікрохвильової та високогідростатичної обробки, які інтенсифікують масоперенос, скорочують тривалість процесу екстракції та зменшують використання реагентів. Ультразвук руйнує клітинні структури сировини, підвищуючи доступність полісахаридів, тоді як мікрохвильова активація сприяє швидкому нагріванню та ефективному вилученню біополімерів.

Суттєвим досягненням є впровадження мембранних технологій (ультрафільтрація, нанофільтрація) для очищення та фракціонування полісахаридів. Мембранне розділення дозволяє отримувати препарати з заданими молекулярними параметрами без використання органічних розчинників, що відповідає вимогам «зеленої» хімії та харчової безпеки. Такі технології забезпечують високу чистоту продукту, необхідну для використання у функціональному та дієтичному харчуванні.

Перспективним напрямом є біокаталітична модифікація полісахаридів, яка дозволяє змінювати їх розчинність, в'язкість, здатність до гелеутворення та біологічну активність. Контрольована деполімеризація або сульфатування

створюють інгредієнти з новими технологічними властивостями — наприклад, покращеними пребіотичними або антиоксидантними характеристиками.

У харчовій промисловості полісахариди тваринного походження застосовуються як:

- ✓ натуральні загущувачі та стабілізатори соусів, паштетів, рибних і м'ясних продуктів;
- ✓ структуроутворювачі у продуктах із пониженим вмістом жиру;
- ✓ компоненти їстівних покриттів і біорозкладної упаковки;
- ✓ носії біологічно активних речовин у системах контрольованого вивільнення;
- ✓ функціональні інгредієнти з детоксикаційними та пребіотичними властивостями.

Інновації також охоплюють наноструктурування полісахаридів — створення нанофібрил і нанокомпозитів хітозану, які мають підвищену реакційну здатність, антимікробні властивості та можуть використовуватись для подовження терміну зберігання харчових продуктів. Такі матеріали формують бар'єрні плівки, що регулюють газо- та вологопроникність упаковки.

Важливим аспектом сучасного виробництва є стандартизація якості: контроль молекулярної маси, ступеня очищення, відсутності алергенів, токсичних домішок і мікробіологічної безпеки. Використання аналітичних методів (хроматографія, спектроскопія, реологічні дослідження) дозволяє забезпечити стабільність функціональних характеристик інгредієнтів у різних харчових системах.

Подальший розвиток технологій пов'язаний із поєднанням біотехнології, наноматеріалознавства та екологічного інжинірингу. Основними тенденціями є створення «чистих» технологічних процесів, персоналізованих функціональних інгредієнтів, а також максимальна утилізація побічної тваринної сировини. Це відкриває широкі можливості для виробництва безпечних, біосумісних і екологічно сталих харчових добавок нового покоління.

Таблиця 32 – Порівняльна характеристика інноваційних технологій виробництва полісахаридів тваринного походження для харчової промисловості

Технологія отримання	Сутність методу	Використовувана сировина	Переваги	Недоліки	Значення для харчової промисловості
Традиційна хімічна екстракція	Обробка кислотами та лугами для виділення полісахаридів	Панцирі панцирних тварин, хрящі, шкіра, кісткова тканина	Високий вихід продукту, відпрацьована технологія	Руйнування біополімерів, велика кількість реагентів, екологічне навантаження	Використовується для масового виробництва загущувачів і стабілізаторів
Ферментативна (біотехнологічна) екстракція	Виділення полісахаридів за допомогою специфічних ферментів	Вторинна м’ясна та рибна сировина, панцирі	Збереження природної структури, висока біологічна активність, екологічність	Вища вартість ферментів, потреба у точному контролі процесу	Отримання функціональних інгредієнтів для дієтичних і оздоровчих продуктів
Ультразвукова обробка	Руйнування клітинних структур акустичною кавітацією	Тверда тваринна сировина, відходи переробки	Прискорення екстракції, зменшення витрат реагентів, підвищення виходу	Потреба у спеціальному обладнанні	Інтенсифікація виробництва харчових добавок та текстурантів
Мікрохвильова екстракція	Швидке нагрівання сировини електромагнітним полем	Панцирі, сполучна тканина, хрящі	Скорочення часу процесу, енергоефективність	Можлива часткова деградація при неправильному режимі	Економічно ефективне виробництво структуроутворювачів
Мембранні технології (ультра-, нано-фільтрація)	Очищення та фракціонування за молекулярною масою через мембрани	Попередньо екстраговані розчини полісахаридів	Висока чистота, відсутність розчинників, контроль властивостей	Вартість мембран та їх обслуговування	Виробництво інгредієнтів для функціональних продуктів і дитячого харчування
Біокаталітична модифікація	Контрольована зміна структури полісахаридів ферментами	Хітин, хітозан, глікозаміноглікани	Можливість отримання продуктів із заданими властивостями	Складність технологічного контролю	Створення інгредієнтів із підвищеною розчинністю, в’язкістю або біоактивністю

Технологія отримання	Сутність методу	Використовувана сировина	Переваги	Недоліки	Значення для харчової промисловості
Наноструктурування (одержання наноформ)	Формування нанофібрил або нанокомпозитів	Хітозан та інші біополімери	Підвищена реакційна здатність, антимікробні властивості	Новизна технологій, потреба у стандартизації	Використання в їстівних покриттях, активній упаковці, системах доставки нутрієнтів
Комплексна безвідходна переробка сировини	Повна утилізація побічних продуктів тваринництва	Відходи рибної, м'ясної та панцирних тварин промисловості	Економічність, екологічність, принципи циркулярної економіки	Необхідність інтегрованих виробничих ліній	Отримання натуральних харчових добавок із мінімальним впливом на довкілля

Сучасні інноваційні технології виробництва полісахаридів тваринного походження поєднують біотехнологічні, фізико-хімічні та зелені методи, що дозволяє отримувати високоякісні, безпечні та біологічно активні продукти. Використання таких технологій відкриває нові перспективи для харчової, фармацевтичної та косметичної промисловості, сприяє розвитку біоінженерії та створенню продуктів функціонального призначення з високою доданою цінністю.

15.3. Використання полісахаридів тваринного походження в харчовій індустрії

Полісахариди тваринного походження, такі як глікоген, хітин, хітозан, гіалуронова кислота, хондроїтинсульфати, представляють собою високомолекулярні біополімери, що мають унікальні технологічні та біологічні властивості. Завдяки своїй здатності утворювати гелі, стабілізувати емульсії, регулювати в'язкість і текстуру харчових систем, вони широко застосовуються у виробництві продуктів харчування. Крім технологічних функцій, ці полісахариди також можуть підвищувати харчову та функціональну цінність продуктів, а деякі мають біоактивні властивості, що позитивно впливають на здоров'я людини.

1. Загущення та гелеутворення. Однією з основних функцій полісахаридів тваринного походження є здатність утворювати гелі та підвищувати в'язкість харчових систем. Хітозан та хондроїтинсульфати широко використовуються для стабілізації кремів, соусів, желе, паштетів та десертів. Ці біополімери формують стабільну структуру продукту, запобігаючи розшаруванню, відділенню вологи та втраті текстурної однорідності.

Крім того, глікоген у вигляді харчових добавок використовується для підвищення текстурних властивостей енергетичних напоїв та спортивних продуктів, що дозволяє покращувати споживчі характеристики та візуальну привабливість продуктів.

2. Стабілізація емульсій. Полісахариди тваринного походження ефективно стабілізують емульсії типу «вода–жир», запобігаючи їх розшаруванню і розділенню фаз. Хітозан застосовується у виробництві майонезів, соусів, кремових начинок, молочних десертів і напівфабрикатів, забезпечуючи однорідну консистенцію та стабільність продукту протягом усього терміну зберігання.

Важливим аспектом є те, що полісахариди утворюють мікроструктури, які утримують дрібні краплі жиру та води, забезпечуючи стабільність емульсії без потреби у синтетичних стабілізаторах або додаткових хімічних добавках.

3. Модифікація текстури. Полісахариди тваринного походження здатні значно впливати на текстуру продуктів, підвищуючи їх пружність, еластичність та здатність утримувати вологу.

У м'ясних та рибних продуктах, таких як ковбаси, паштети та пресовані рибні вироби, хітозан виступає природним стабілізатором і текстуроутворювачем, підвищуючи пружність і зберігаючи соковитість. Гіалуронова кислота та хондроїтинсульфати додаються у напівфабрикати та соуси для створення кремоподібної або гелеоподібної структури, що покращує органолептичні властивості продукту та підвищує його споживчу привабливість.

4. Антимікробні та консервуючі властивості. Деякі полісахариди, зокрема хітозан, володіють антимікробною активністю та здатністю

пригнічувати ріст бактерій і грибів. Це робить їх ефективними натуральними консервантом для харчових продуктів.

Хітозан застосовується у виробництві покриттів для сирів, ковбас, риби та напівфабрикатів, що дозволяє подовжити термін зберігання продуктів без використання синтетичних консервантів. Крім того, антимікробна дія підвищує безпечність продуктів і зменшує ризик псування під час транспортування та зберігання.

5. Біоактивні та функціональні властивості. Полісахариди тваринного походження можуть виконувати функції біологічно активних інгредієнтів. Хондроїтинсульфати та гіалуронова кислота сприяють підтримці суглобів, зволоженню тканин та забезпечують антиоксидантний захист.

Ці властивості використовуються у виробництві функціональних продуктів харчування, дієтичних добавок, спортивного харчування та нутрицевтиків. Завдяки їм продукти можуть поєднувати харчову цінність і терапевтичний ефект, що особливо актуально для продуктів для здорового способу життя.

6. Використання як носії біоактивних речовин. Полісахариди тваринного походження здатні діяти як капсулюючі агенти для вітамінів, пробіотиків, ароматизаторів та інших функціональних компонентів. Вони захищають активні речовини від руйнування під час виробництва та зберігання, контролюють їх поступове вивільнення і підвищують біодоступність.

Наприклад, хітозанові мікрокапсули застосовуються у функціональних десертах, напоях та спортивних добавках, що дозволяє створювати продукти з контрольованою доставкою біоактивних інгредієнтів.

7. Використання в упаковці та покриттях. На основі хітозану виробляють їстівні плівки та покриття для риби, м’яса, фруктів та овочів. Такі плівки виконують бар’єрну функцію, зменшують втрату вологи, запобігають окисненню жирів і подовжують термін зберігання без додавання хімічних консервантів.

Їстівні покриття з полісахаридів також дозволяють поліпшити зовнішній вигляд продуктів і підтримувати їх органолептичні властивості протягом тривалого часу.

Сумісність з концепцією «clean label». Полісахариди тваринного походження є натуральними, безпечними та біодеградованими. Їх застосування дозволяє виробникам створювати «чисті» продукти без штучних загущувачів, стабілізаторів або консервантів, що відповідає сучасним вимогам споживачів до безпечних і натуральних продуктів харчування.

Таблиця 33 – Застосування полісахаридів тваринного походження у харчових продуктах

Група продуктів	**Полісахарид**	**Функція**	**Приклади застосування**
М'ясні продукти	Хітозан, хондроїтинсульфати	Загущувач, стабілізатор, текстуроутворювач	Ковбаси, паштети, м'ясні делікатеси, пресовані продукти
Рибні продукти	Хітозан, глікоген	Стабілізатор, гелеутворювач, антимікробний агент	Солона і копчена риба, рибні пресовані вироби, консерви, паштети
Молочні продукти	Глікозаміноглікани, хітозан	Загущувач, стабілізатор, поліпшення текстури	Йогурти, десерти, креми, сирні продукти
Десерти та напої	Глікоген, хітозан, гіалуронова кислота	Гелеутворювач, стабілізатор, носій біоактивних речовин	Желе, мармелад, напої для спортсменів, дієтичні десерти
Функціональні продукти та нутрицевтики	Хондроїтинсульфати, гіалуронова кислота, хітозан	Біоактивність, носій вітамінів та пробіотиків, антиоксидант	Спортивне харчування, добавки для підтримки суглобів, пробіотичні продукти
Їстівні покриття та упаковка	Хітозан	Бар'єрна функція, антибактеріальна дія, продовження терміну зберігання	Покриття для риби, м'яса, фруктів; плівки для харчових продуктів без консервантів

Полісахариди тваринного походження виконують багатофункціональні ролі у харчовій промисловості. Вони підвищують текстуру, стабільність і безпечність продуктів, забезпечують антиоксидантну та антимікробну дію, а також сприяють створенню функціональних і «чистих» харчових продуктів. Інноваційні форми полісахаридів, такі як нанофібрильні комплекси, хітозан і глікозаміноглікани, відкривають широкі можливості для виробництва продуктів нового покоління, що поєднують технологічну ефективність, біологічну активність та екологічну безпечність.

Питання для самоконтролю

1. Що таке полісахариди тваринного походження та які основні біополімери до них належать?
2. Які фізико-хімічні властивості роблять полісахариди тваринного походження цінними для харчової промисловості?
3. Яку роль відіграє хітозан у загущенні та гелеутворенні харчових продуктів?
4. Як хондроїтинсульфати та гіалуронова кислота впливають на текстуру напівфабрикатів і соусів?
5. В чому полягає роль полісахаридів у стабілізації емульсій «вода–жир»?
6. Які продукти харчової промисловості найчастіше містять хітозан як текстуроутворювач?
7. Яким чином хітозан проявляє антимікробну активність у харчових продуктах?
8. Для чого полісахариди можуть використовуватися як носії біоактивних речовин?
9. Наведіть приклади функціональних продуктів, у яких застосовуються хондроїтинсульфати та гіалуронова кислота.
10. Як використання полісахаридів тваринного походження сприяє концепції «clean label»?

11. Які технологічні ефекти забезпечують полісахариди у м'ясних та рибних продуктах?

12. У яких харчових продуктах застосовуються їстівні покриття на основі хітозану?

13. Яким чином полісахариди підвищують термін зберігання харчових продуктів?

14. Які інноваційні форми полісахаридів використовуються для створення сучасних харчових продуктів?

15. Поясніть, як полісахариди тваринного походження поєднують технологічну ефективність та біологічну активність у харчових продуктах.

Рекомендована навчальна література

1. Касумова С. А. Технологія желатину : навч. посіб. Київ : НУХТ, 2012. 127 с.
2. Калакура М. М. Хімія харчових продуктів : підручник / М. М. Калакура, І. Ф. Малежик, Л. І. Корецька. Київ : НУХТ, 2016. 504 с.
3. Технологія переробки гідробіонтів : навч. посіб. / за ред. О. В. Семенюка. Одеса : ОНАХТ, 2018. 320 с.
4. Малишев В. В., Українець А. І., Габрик С. В. Нанотехнології та наноматеріали у харчовій промисловості : навч. посіб. Київ : НУХТ, 2018. 320 с.
5. Гіржев О. О. Біотехнологічні аспекти переробки вторинної сировини тваринництва : монографія. Одеса : ОНАХТ, 2017. 182 с.
6. Біополімерні матеріали для пакування харчових продуктів : навч. посіб. / В. М. Пасічний та ін. Київ : НУХТ, 2021. 215 с.
7. Chitin and Chitosan: Properties and Applications / ed. by S. van den Broek et al. Wiley, 2020. 512 p
8. Glycosaminoglycans: Chemistry and Biology / ed. by G. Zoppetti. London : Academic Press, 2018. 380 p.
9. Handbook of Hydrocolloids / ed. by G. O. Phillips, P. A. Williams. 3rd ed. Cambridge : Woodhead Publishing, 2020. 948 p.

ВИСНОВКИ

Запропонований навчальний посібник, призначений для студентів, аспірантів та фахівців, присвячений інноваційним технологіям цукристих речовин і продуктів. Він побудований на основі даних та досягнень харчової науки та виробництв за останні п’ять років. Усі наведені матеріали ґрунтуються на науковому та виробничому досвіді в інноваційній сфері, що робить цей посібник важливим джерелом концентрованих знань у ключовій галузі харчової промисловості.

Посібник дозволяє знаходити відповіді на сучасні виклики промисловості, розкриває особливості різних технологій і демонструє масштаби сучасного технологічного обладнання, завдяки якому досягається новий рівень якості у широкому спектрі виробництва цукрових продуктів та їхніх похідних. Він робить зрозумілими процеси, що задіюють передові технології, такі як цифровізація, штучний інтелект, аналітичні методи, які не лише підвищують ефективність виробництва, а й сприяють раціональному використанню сировини, захисту навколишнього середовища, залученню альтернативних джерел сировини, забезпеченню безпеки людського здоров’я та створенню нових функціональних харчових продуктів, що дає споживачам більше можливостей вибору у сучасних умовах.

Навчальний посібник орієнтує читача на формування сучасної культури споживання цукристих продуктів і стимулює фахівців до творчого підходу у вдосконаленні або створенні нових технологій, спираючись на знання інноваційних підходів у виробництві харчових продуктів не лише звичного асортименту, а й продуктів нової, затребуваної якості.

Кожний розділ посібника не лише знайомить з конкретними технологіями та обладнанням у цукровій промисловості, але й заохочує до творчого мислення, генерування інноваційних ідей для покращення виробничих процесів, що відповідає сучасним теоріям управління якістю харчової продукції. Мета,

поставлена на початку роботи над посібником, хоча й частково, але вже досягнута.

Вражає різноманіття сучасних технологій і обладнання, які неможливо повністю охопити в одному виданні. Однак це стимулює до подальшої роботи в цьому напрямку: створення більш детальних описів конкретних технологій і процесів, що активно застосовуються на сучасному рівні та інтегрують передові технологічні методи, такі як омічний нагрів, високий та надвисокий тиск, ультрафіолетове опромінення, ультразвук, мікрохвильовий нагрів та інші.

Завдяки цим технологіям досягається висока якість кінцевої продукції, покращуються умови праці на особливо важких і небезпечних ділянках виробництва, забезпечується дотримання техніки безпеки та гігієни, підвищується ступінь переробки сировини, а також ефективно управляються відходи та викиди в навколишнє середовище. Саме такі технології визначають майбутнє галузі, і для їх розуміння необхідні ґрунтовні знання та постійне навчання. У цьому полягає головне призначення нашого колективного навчального посібника.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Вирощування цукрових буряків за мінімальною технологією зберігає вологість ґрунту. URL: https://agronews.ua/news/vyroshchuvannia-tsukrovykh-buriakiv-za-minimalnoiu-tekhnolohiieiu-zberihaie-volohist-gruntu/ (дата звернення: 25.05.2025).
2. Цукрова тростина: зародження виробництва цукру. URL: http://www.ukrsugar.com/uk/post/cukrova-trostina-zarodzenna-virobnictva-cukru (дата звернення: 25.05.2025).
3. Сорго цукрове (sorghum sacchartum). Резервна культура для виробництва цукру і не тільки... URL: https://s-sorgo.com.ua/ua/a356245-sorgo-saharnoe-sorghum.html (дата звернення: 27.05.2025).
4. Використання сорго на кормові цілі. URL: https://s-sorgo.com.ua/ua/a484518-ispolzovanie-sorgo-kormovye.html (дата звернення: 30.05.2025).
5. Солодка та цілюща продукція клена цукрового. Історія використання в кулінарії та цілительстві. URL: https://ogorodniki.com/uk/article/solodka-ta-tsiliushcha-produktsiia-klena-tsukrovogo-istoriia-vikoristannia-v-kulinarii-ta-tsilitelstvi (дата звернення: 20.06.2025).
6. Білий цукор: користь чи шкода? URL: https://t1.ua/porady/17345-bilyy-tsukor-koryst-chy-shkoda.html (дата звернення: 20.06.2025).
7. Коричневий цукор натуральний тростинний. URL: https://prom.ua/ua/p1517582319-korichnevyj-sahar-naturalnyj.html (дата звернення: 26.06.2025).
8. PalSugarIce® Ice sugar manufacturing unit. URL: https://www.palamaticprocess.com/process-lines/icing-sugar-manufacturing-unit-palsugarice
9. Screw feeder - 4 models from D10 to D13. URL: https://www.palamaticprocess.com/bulk-handling-equipment/screw-feeder (дата звернення: 26.06.2025).
10. Фінікові сиропи. URL: https://rozetka.com.ua/ua/section/finikovye-siropy/ (дата звернення: 27.06.2025).
11. Review of the Imperial Sugar Dust Explosion. URL: https://dustsafetyscience.com/imperial-sugar-dust-explosion/ (дата звернення: 28.06.2025).
12. Iwuozor, K. O., Ojeyemi, T., Emenike, E. C., Umeh, C. T., Egbemhenghe, A., Ayoku, B. D., Ogunsanya, T. I., Ogunniyi, S., Ighalo, J. O., & Adeniyi, A. G. (2024). Management of sugar dust in the sugar industry. Heliyon, 10(1), Article e23158. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23158
13. Машина для миття овочів MB, Pro-Vega. URL: https://agrobiz.net/static-files/img/goods/39/79/barabanni-miyni-mashini-dlya-ovochiv-mbl-pro-vega-10820001.jpg (дата звернення: 29.06.2025).
14. Beet chopper SCЦБ-12 (16), СЦ2Б-12 (16). URL: https://terrapumps.com.ua/beet-chopper-sscb-12-16-sc2b-12-16/ (дата звернення: 29.06.2025).
15. Maguin - Drum Beet Slicer. URL: https://www.agriculture-xprt.com/products/maguin-drum-beet-slicer-1091677 (дата звернення: 30.06.2025).
16. Процеси і апарати. Механічні процеси і технології надвисокого тиску : підручник / В. С. Бойко, К. О. Самойчук, В. Г. Тарасенко та ін. Мелітополь : Люкс, 2019. 273 с.
17. Дискові фільтри. URL: https://ua.esmil.eu/product/disk-filtres/ (дата звернення: 05.07.2025).
18. Aluminium Sugar Mill Vacuum Filter. URL: https://surl.li/wmbmbn (дата звернення: 05.07.2025).
19. Evaporation solutions with advanced design. URL: https://www.fivesgroup.com/sugar/equipment-for-every-step-of-sugar-production (дата звернення: 07.07.2025).
20. Vacuum Systems For Sugar Production. URL: https://www.nashpumps.com/en-is/industries/food-and-beverage/sugar-production (дата звернення: 08.07.2025).

21. Superior equipment to optimize performance and energy savings. URL: https://surl.li/konuby (дата звернення: 09.07.2025).
22. Industry standard sugar crystallization technology. URL: https://www.fivesgroup.com/sugar/equipment-for-every-step-of-sugar-production (дата звернення: 10.07.2025).
23. Barometric condensers for optimum quality and low water consumption. URL: https://www.fivesgroup.com/sugar/equipment-for-sugar-production/crystallization (дата звернення: 11.07.2025).
24. Cail & Fletcher vertical crystallizer and massecuite reheater. URL: https://webasset.fivesgroup.com/Sugar/BROCHURES/FIVES_SUGAR_Cail_and_Fletcher_vertical_crystallizer_and_massecuite_reheater.pdf (дата звернення: 12.07.2025).
25. TITAN BATCH CENTRIFUGALS. URL: https://www.westernstates.com/products/titan-batch-centrifugal/ (дата звернення: 12.07.2025).
26. High-grade massecuite centrifugation equipment. URL: https://www.fivesgroup.com/sugar/equipment-for-every-step-of-sugar-production (дата звернення: 14.07.2025).
27. Ingetecsa Sugar. URL: https://www.ingetecsa.com/special-applications/sugar-dryer/ (дата звернення: 15.07.2025).
28. Gemini (версія 1.5 Flash) : мультимодальна модель штучного інтелекту від Google. URL: https://gemini.google.com/ (дата звернення: 17.07.2025).
29. Розумна пасіка. URL: https://amohive.com/wp-content/uploads/2021/10/germany_4.jpg (дата звернення: 16.07.2025).
30. Розумний вулик SmartHive. URL: https://bestbees.com/smarthive-lp/ (дата звернення: 17.07.2025).
31. Мед бджолиний. URL: https://www.eko-med.in.ua/magasin/mjod-pchelinyj (дата звернення: 18.07.2025).
32. Particular Features. URL: https://www.myandegroup.com/shop/pin-mill (дата звернення: 20.07.2025).
33. Centrifugal Separator. URL: https://www.myandegroup.com/shop/centrifugal-separator (дата звернення: 21.07.2025).
34. Screw Press. URL: https://www.myandegroup.com/shop/screw-press (дата звернення: 22.07.2025).
35. Tube Bundle Dryer. URL: https://www.myandegroup.com/shop/tube-bundle-dryer (дата звернення: 23.07.2025).
36. Degerming Mill. URL: https://www.myandegroup.com/shop/degerming-mill (дата звернення: 24.07.2025).
37. Washing Cyclone. URL: https://www.myandegroup.com/shop/washing-cyclone (дата звернення: 25.07.2025).
38. Flash Dryer. URL: https://www.myandegroup.com/shop/flash-dryer (дата звернення: 26.07.2025).
39. Modified Starch Cooker. URL: https://www.myandegroup.com/shop/modified-starch-cooker (дата звернення: 27.07.2025).
40. Ion Exchange Column. URL: https://www.myandegroup.com/shop/ion-exchange-column (дата звернення: 27.07.2025).
41. Ультразвукові гомогенізатори. URL: https://www.hielscher.com/wp-content/uploads/feasibility-optimization-scale-up-v02.2018.jpg (дата звернення: 28.07.2025).
42. Higher Pectin Yields with Ultrasonic Extraction. URL: https://www.hielscher.com/higher-pectin-yields-with-ultrasonic-extraction.htm (дата звернення: 29.07.2025).

43. Гуарова камедь. URL: https://chemtraidingplus.deal.by/p36601085-guarovaya-kamed.html (дата звернення: 30.07.2025).
44. Камедь Caesalpinia spinosa. Caesalpinia spinosa gum. URL: https://safetymakeup.com.ua/ingredients/caesalpinia_spinosa_gum (дата звернення: 02.08.2025).
45. Що таке кероб та яка його користь і застосування. URL: https://tsn.ua/zdorovya/shcho-take-kerob-i-iak-yoho-zastosovuiut-u-kharchuvanni-2879777.html (дата звернення: 02.08.2025).
46. Насіння льону: користь та шкода, як приймати для максимальної користі? URL: https://fitomarket.com.ua/ua/fitoblog/semena-lna-polza-metodi-upotreblenija-i-protivopokazanija (дата звернення: 03.08.2025).
47. Наноцелюлоза – це інноваційне рішення для покращення характеристик продуктів формування целюлози. URL: https://ua.bagasse-packaging.com/info/nanocellulose-is-an-innovative-solution-to-imp-102009864.html (дата звернення: 05.08.2025).
48. Півоваров О. А., Ковальова О. С., Кошулько В. С. Інноваційний інжиніринг в окремих галузях харчового виробництва. Дніпро : ФОП Обдимко О. С., 2022. 407 с.
49. Півоваров О.А., Ковальова О.С., Кошулько В.С. Інноваційні технології переробки риби, рибних відходів, нерибних і морських продуктів : Навчальний посібник. Дніпро : ДДАЕУ, 2024. 334 с.
50. Півоваров О.А., Ковальова О.С., Кошулько В.С. Інноваційні технології та обладнання переробки м'яса та продуктів на його основі : Навчальний посібник. Дніпро : ДДАЕУ, 2025. 402 с.
51. Півоваров О. А., Ковальова О. С., Кошулько В. С. Інноваційні технології та обладнання бродильних виробництв : навч. посіб. Дніпро : ФОП Обдимко О. С., 2025. 396 с.
52. Півоваров О.А., Ковальова О.С., Кошулько В.С., Тертишний О.О. Інноваційні технології та обладнання переробки молока: Навчальний посібник. Дніпро : ДДАЕУ, 2026. 461с.
53. Півоваров О. А., Ковальова О. С., Лазаренко У. І. Застосування нетрадиційних підсолоджувачів натурального походження для виготовлення сухих сніданків. Наука, технології, інновації. 2024. № 2 (30). С. 70–81. DOI: http://doi.org/10.35668/2520-6524-2024-2-09
54. Ковальова О. С. Удосконалення технології виробництва солоду з використанням плазмохімічно активованої води : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.05 / Науціональний університет харчових технологій. Київ, 2013.
55. Півоваров О. А., Ковальова О. С., Пугач А. М., Кірьянова К. Д. Виробництво шоколадної пасти з солодовим наповнювачем. Наука, технології, інновації. 2023. № 3 (27). С. 80–95. DOI: https://doi.org/10.35668/2520-6524-2023-3-08
56. Безжовча Д. О., Ковальова О. С., Кошулько В. С. Перспективи використання гречаного солоду у виробництві солодових екстрактів. Збірник наукових праць магістрантів та студентів. Мелітополь : ТДАТУ, 2022. С. 190–192.
57. Півоваров О. А., Ковальова О. С. Сучасні методи інтенсифікації солодорощення : монографія. Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2020. 242 с.
58. Чурсінов Ю. О., Ковальова О. С. Аналіз перспектив використання відходів солодового та пивоварного виробництв. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. № 1 (96). С. 144–149.
59. Ковальова О. С. Виробництво полісолодів з використанням плазмохімічно активної води. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доп. міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів (м. Тернопіль, 11–12 груд. 2013 р.). Тернопіль : ТНТУ, 2013. С. 255–256.
60. Черних С. А., Ковальова О. С. Кексові напівфабрикати з додаванням солоду. Хранение и переработка зерна. 2013. № 8 (173). С. 52–54.

61. Півоваров О. А., Ковальова О. С. Дослідження процесу розщеплення вуглеводів в зерні при пророщуванні з використанням водних розчинів, оброблених контактною нерівноважною плазмою. Вопросы химии и химической технологии. 2012. № 1. С. 37–41.
62. Півоваров О. А., Ковальова О. С. Розділ 4. Фізико-хімічні та біологічні процеси солодорощення з використанням водних розчинів, оброблених контактною нерівноважною плазмою. Дніпро : ДДАЕУ, 2022.
63. Півоваров О.А., Ковальова О.С., Ганзій М.Р., Драюк В.С. Особливості технології та перспективи виробництва комбучі з різноманітної сировини. Наука, технології, інновації. 2025. № 2(34). С. 100-112. DOI: http://doi.org/10.35668/2520-6524-2025-2-09
64. Півоваров О., Ковальова О. Застосування активованих нерівноважною плазмою водних розчинів в харчових виробництвах. Теоретичні та практичні питання аграрної науки : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (Дніпро, 18 трав. 2022 р.) : у 2 ч. / за заг. ред. А. С. Кобця. Дніпро : ДДАЕУ, 2022. Ч. 1. С. 298–300. URL: https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/7054/1/6.pdf#page=298
65. Ковальова О., Ганзій М., Драюк В. Перспективи використання відходів пивоваріння. Innovations in Science: From Theoretical Foundations to Practical Impact : Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference (Antwerp, Belgium, May 12–14, 2025). Antwerp : European Open Science Space, 2025. С. 92–99. https://doi.org/10.70286/EOSS-12.05.2025
66. Чурсінов Ю. О., Ковальова О. С. Аналіз перспектив використання відходів солодового та пивоварного виробництв. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. № 1 (96). С. 144–149.
67. Ковальова О. С., Вакуленко А. В. Перспективні види нетрадиційної сировини для виробництва квіткових вин. Актуальні питання біотехнології, екології та природокористування : матеріали Міжнар. наук. конф. (Харків, 25–26 квіт. 2024 р.). Харків : ДБТУ, 2024. С. 85–87. URL: http://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi/
68. Paz, J. E. M., Dantas, A. M., Fernandes, D. D. S., & Pontes, M. J. C. (2024). Classification of sugar using digital imaging and pattern recognition techniques. Journal of Food Composition and Analysis, 125, Article 105796. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105796
69. Zaitoun, M., Ghanem, M., & Harphoush, S. (2018). Sugars: Types and their functional properties in food and human health. International Journal of Public Health Research, 6(4), 93–99. URL: http://www.openscienceonline.com/journal/ijphr
70. Ayustaningwarno, F., Asikin, Y., Amano, R., et al. (2023). Composition of minerals and volatile organic components of non-centrifugal cane sugars from Japan and ASEAN countries. Foods, 12(7), Article 1406. DOI: https://doi.org/10.3390/foods12071406
71. Prakash, A., & Kumar, M. (2025). Performance assessment of an advanced solar concatenated sugarcane juice distiller. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 104, Article 104102. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.104102
72. Hortinela, C., et al. (2019). Classification of cane sugar based on physical characteristics using SVM. 2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM), 1–5. DOI: https://doi.org/10.1109/HNICEM48295.2019.9072699
73. Eriklioglu, H., Ilhan, E., Khodasevich, M., Korolko, D., Manley, M., Castillo, R., & Oztop, M. H. (2023). Classification and quantification of sucrose from sugar beet and sugarcane using optical spectroscopy and chemometrics. Journal of Food Science, 88(8), 3274–3286. DOI: https://doi.org/10.1111/1750-3841.16674
74. Zhang, J., Meng, Y., Wu, J., Qin, J., Wang, H., Yao, T., & Yu, S. (2020). Monitoring sugar crystallization with Deep Neural Networks. Journal of Food Engineering, 280, Article 109965. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109965

75. Ortiz, A. C., Fideles, S. O. M., Reis, C. H. B., Pagani, B. T., Bueno, L. M. M., Moscatel, M. B. M., Buchaim, R. L., & Buchaim, D. V. (2024). D-Tagatose: A rare sugar with functional properties and antimicrobial potential against oral species. Nutrients, 16(12), Article 1943. DOI: https://doi.org/10.3390/nu16121943
76. Dana, H., & Sonia, A. (2024). Substituting sugar in pastry and bakery products with functional ingredients. Applied Sciences, 14(18), Article 8563. DOI: https://doi.org/10.3390/app14188563
77. Lutin, F., Bailly, M., & Bar, D. (2002). Process improvements with innovative technologies in the starch and sugar industries. Desalination, 148(1-3), 121–124. DOI: https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00664-1
78. Ueda, J. M., Morales, P., Fernández-Ruiz, V., Ferreira, A., Barros, L., Carocho, M., & Heleno, S. A. (2023). Powdered foods: Structure, processing, and challenges: A review. Applied Sciences, 13(22), Article 12496. DOI: https://doi.org/10.3390/app132212496
79. Ermis, E., & Özkan, M. (2021). Sugar beet powder production using different drying methods, characterization and influence on sensory quality of cocoa-hazelnut cream. Journal of Food Science and Technology, 58(6), 2068–2077. DOI: https://doi.org/10.1007/s13197-020-04715-9
80. Jadhav, H. B., & Choudhary, P. (2024). Emerging techniques for the processing of food to ensure higher food safety with enhanced food quality: A review. Discovery Food, 4, Article 20. DOI: https://doi.org/10.1007/s44187-024-00089-5
81. Abulafia, D. (2008). Sugar in Spain. European Review, 16(2), 191–210. DOI: https://doi.org/10.1017/S1062798708000148
82. Bushnaq, H., Krishnamoorthy, R., Abu-Zahra, M., Hasan, S. W., Taher, H., Alomar, S. Y., Ahmad, N., & Banat, F. (2022). Supercritical technology-based date sugar powder production: Process modeling and simulation. Processes, 10(2), Article 257. DOI: https://doi.org/10.3390/pr10020257
83. Mohd Baroyi, S. A. H., Abel, S. E. R., Al-Awaadh, A. M., Fikry, M., Abdul Karim Shah, N. N., Mohd Salleh, F. S., Garg, V., Deng, T., & Yusof, Y. A. (2024). Sweet flow: Exploring the flowability, caking, morphology, and solubility of date sugars as promising sugar substitutes. Powder Technology, 443, Article 119925. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119925
84. Sayah, I., Njehi, M., Cicero, N., Nava, V., M'hadheb, M. B., Majdoub, H., Achour, S., & Gervasi, T. (2024). Optimization of sugar extraction process from date waste using full factorial design toward its use for new biotechnological applications. BioTech, 13(4), Article 39. DOI: https://doi.org/10.3390/biotech13040039
85. Moghbeli, S., Jafari, S. M., Maghsoudlou, Y., & Dehnad, D. (2020). A Taguchi approach optimization of date powder production by spray drying with the aid of whey protein-pectin complexes. Powder Technology, 359, 85–93. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.013
86. Sayas-Barberá, E., Paredes, C., Salgado-Ramos, M., Pallarés, N., Ferrer, E., Navarro-Rodríguez de Vera, C., & Pérez-Álvarez, J. Á. (2023). Approaches to enhance sugar content in foods: Is the date palm fruit a natural alternative to sweeteners? Foods, 13(1), Article 129. DOI: https://doi.org/10.3390/foods13010129
87. Hajji, W., & Bellagha, S. (2024). Effect of drying and grinding on biochemical and functional properties of Deglet Nour date fruit powder. International Journal of Innovative Approaches in Agricultural Research, 8(1), 15–30. DOI: https://doi.org/10.29329/ijiaar.2024.656.2
88. Benalaya, I., Alves, G., Lopes, J., & Silva, L. R. (2024). A review of natural polysaccharides: Sources, characteristics, properties, food, and pharmaceutical applications. International Journal of Molecular Sciences, 25(2), Article 1322. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms25021322
89. Balart, R., Garcia-Garcia, D., Fombuena, V., Quiles-Carrillo, L., & Arrieta, M. P. (2021). Biopolymers from natural resources. Polymers, 13(15), Article 2532. DOI: https://doi.org/10.3390/polym13152532

90. Guo, Z., Yan, Z., Chen, Y., Ieong, W. I., Zhong, T., Xiao, Y., & Yu, X. (2025). Protective role of natural saccharides in frozen animal food formulations: Enhancing cryopreservation during cold treatment. International Journal of Biological Macromolecules, 321(1), Article 146222. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146222

91. Benalaya, I., Alves, G., Lopes, J., & Silva, L. (2023). A review of natural polysaccharides: Sources, characteristics, properties, food and pharmaceutical applications (Preprint). MDPI Preprints. DOI: https://doi.org/10.20944/preprints202312.1862.v1

92. Hernandez-Hernandez, O., Sabater, C., Calvete-Torre, I., et al. (2024). Tailoring the natural rare sugars D-tagatose and L-sorbose to produce novel functional carbohydrates. npj Science of Food, 8, Article 74. DOI: https://doi.org/10.1038/s41538-024-00320-8

93. Monteiro-Alfredo, T., Caramelo, B., Arbeláez, D., Amaro, A., Barra, C., Silva, D., Oliveira, S., Seiça, R., & Matafome, P. (2021). Distinct impact of natural sugars from fruit juices and added sugars on caloric intake, body weight, glycaemia, oxidative stress and glycation in diabetic rats. Nutrients, 13(9), Article 2956. DOI: https://doi.org/10.3390/nu13092956

94. Arshad, S., Rehman, T., Saif, S., Rajoka, M. S. R., Ranjha, M. M. A. N., Hassoun, A., Cropotova, J., Trif, M., Younas, A., & Aadil, R. M. (2022). Replacement of refined sugar by natural sweeteners: Focus on potential health benefits. Heliyon, 8(9), Article e10711. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10711

95. Kim, E. (2023). Effects of natural mono- and di-saccharide as alternative sweeteners on inflammatory bowel disease: A narrative review. Korean Journal of Community Nutrition, 28(3), 181–191.

96. Xiang, J., Liu, F., Wang, B., Chen, L., Liu, W., & Tan, S. (2021). A literature review on Maillard reaction based on milk proteins and carbohydrates in food and pharmaceutical products: Advantages, disadvantages, and avoidance strategies. Foods, 10(9), Article 1998. DOI: https://doi.org/10.3390/foods10091998

97. Huang, Y., Chen, Z., Chen, B., Li, J., Yuan, X., Li, J., et al. (2023). Dietary sugar consumption and health: Umbrella review. BMJ, 381, Article e071609. DOI: https://doi.org/10.1136/bmj-2022-071609

98. Şahin, O. I. (2021). Seaweed polysaccharides: Structure, extraction and applications. In Seaweed Polysaccharides: Isolation, Biological, and Biomedical Applications. Wiley. DOI: https://doi.org/10.1002/9781119711414.ch4

99. Xie, C., Lee, Z. J., Ye, S., Barrow, C. J., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2023). A review on seaweeds and seaweed-derived polysaccharides: Nutrition, chemistry, bioactivities, and applications. Food Reviews International, 40(5), 1312–1347. DOI: https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2212055

100. Otero, P., Carpena, M., Garcia-Oliveira, P., Echave, J., Soria-Lopez, A., Garcia-Perez, P., ... & Prieto, M. A. (2021). Seaweed polysaccharides: Emerging extraction technologies, chemical modifications and bioactive properties. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 63(13), 1901–1929. DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1969534

101. Akter, A., Sobuj, M. K. A., Islam, M. S., Chakroborty, K., Tasnim, N., Ayon, M. H., ... & Rafiquzzaman, S. M. (2024). Seaweed polysaccharides: Sources, structure and biomedical applications with special emphasis on antiviral potentials. Future Foods, 10, Article 100440. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100440

102. Mamede, M., Cotas, J., Bahcevandziev, K., & Pereira, L. (2023). Seaweed polysaccharides in agriculture: A next step towards sustainability. Applied Sciences, 13(11), Article 6594. DOI: https://doi.org/10.3390/app13116594

103. Chudasama, N. A., Sequeira, R. A., Moradiya, K., & Prasad, K. (2021). Seaweed polysaccharide based products and materials: An assessment on their production from a

sustainability point of view. Molecules, 26(9), Article 2608. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules26092608

104. Lomartire, S., & Gonçalves, A. M. M. (2022). Novel technologies for seaweed polysaccharides extraction and their use in food with therapeutically applications—A review. Foods, 11(17), Article 2654. DOI: https://doi.org/10.3390/foods11172654

105. Dobrinčić, A., Balbino, S., Zorić, Z., Pedisić, S., Bursać Kovačević, D., Elez Garofulić, I., & Dragović-Uzelac, V. (2020). Advanced technologies for the extraction of marine brown algal polysaccharides. Marine Drugs, 18(3), Article 168. DOI: https://doi.org/10.3390/md18030168

106. Jönsson, M., Allahgholi, L., Sardari, R. R. R., Hreggviðsson, G. O., & Nordberg Karlsson, E. (2020). Extraction and modification of macroalgal polysaccharides for current and next-generation applications. Molecules, 25(4), Article 930. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules25040930

107. Dulanlebit, Y. H., & Hernani, H. (2023). Overview of extraction methods for extracting seaweed and its applications. Jurnal Penelitian Pendidikan IPA, 9(2), 817–824. DOI: https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i2.3053

108. Cameselle Llanos, C., Queffelec, J., Flórez-Fernández, N., Torres, M., & Domínguez, H. (2025). Extraction and fractioning of polysaccharides from seaweeds. In Sustainable Seaweed Processing. Elsevier. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21674-9.00004-0

109. Flórez-Fernández, N., Balboa, E. M., & Domínguez, H. (2020). Extraction and purification of fucoidan from marine sources. In S.-K. Kim (Ed.), Encyclopedia of Marine Biotechnology. Wiley. DOI: https://doi.org/10.1002/9781119143802.ch44

110. Maskur, M., Mohammad, S., & Ketut, S. (2023). Environmental-friendly extraction methods to produce bioactive compounds in seaweed. Research Journal of Chemistry and Environment, 27, 114–121.

111. Yang, M., Deng, Q., Chen, R., Sun, Y., Zhou, X., & Chen, H. (2024). Extraction, purification, structural characteristics, and biological activities of seaweed polysaccharides: A review. Starch, 77, Article 2400029. DOI: https://doi.org/10.1002/star.202400029

112. Abdelrahim, R., Otitolaiye, V., Omer, F., Abdelbasit, Z., & Balida, D. A. (2023). Occupational safety and health management in selected industrial sectors in Sudan. International Journal of Occupational Safety and Health, 13(3), 361–374. DOI: https://doi.org/10.3126/ijosh.v13i3.46418

113. Debela, M., Kebeta, N. D., Begosaw, A. M., Okello, G., & Azage, M. (2023). Bagasse dust exposure and chronic respiratory symptoms among workers in the Metehara and Wonji sugar factories in Ethiopia: A longitudinal study design. BMJ Open Respiratory Research, 10(1), Article e001511. DOI: https://doi.org/10.1136/bmjresp-2022-001511

114. Iwuozor, K. O., Ojeyemi, T., Emenike, E. C., Umeh, C. T., Egbemhenghe, A., Ayoku, B. D., Ogunsanya, T. I., Ogunniyi, S., Ighalo, J. O., & Adeniyi, A. G. (2024). Management of sugar dust in the sugar industry. Heliyon, 10(1), Article e23158. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23158

115. Liang, S., Li, X., Jiang, J., Zhong, Y., Sun, Y., Jiang, Z., Yang, L., & Hao, P. (2023). Study of explosion characteristics and mechanism of sucrose dust. Processes, 11(1), Article 176. DOI: https://doi.org/10.3390/pr11010176

116. Mohammed, K., Iwuozor, K., Anyanwu, V., & Olaniyi, B. (2023). Sugar dust explosion in the sugar industry: Case studies and prevention strategies. Sugar Tech, 26, 1–12. DOI: https://doi.org/10.1007/s12355-023-01307-7

117. Musavi, F., Hekmatshoar, R., Fallahi, M., Moradi, A., & Yazdani-Aval, M. (2024). Identifying and preventing human error in the sugar production process: A multi-stage approach using HTA, HEC and PHEA techniques. Heliyon, 10(9), Article e29687. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29687

118. Samilyk, M., & Korniienko, D. (2024). Analysis and assessment of potential risks in the production of enriched sugar. Technology Audit and Production Reserves, 3(3 (77)), 44–48. DOI: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.307282

119. Biswas, S., Pamucar, D., & Simic, V. (2024). Technology adaptation in sugarcane supply chain based on a novel p, q Quasirung Orthopair Fuzzy decision making framework. Scientific Reports, 14, Article 26486. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-75528-5

120. José, F., Alvarez, F., Baez-Smith, C., & Weiss, L. (2001). Modelling the new technology raw sugar factory/refinery using Sugars™ for Windows®. International Sugar Journal, 103(1230), 253–258.

121. Kuznetsova, A., Zholdoyakova, G., Akhmetyanova, A., & Kuznetsov, A. (2024). Trends in global sugar beet production and sugar consumption levels. Agrarian Science, (3), 157–162. DOI: https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-380-3-157-162

122. Mongi, R. J., & Ngoma, S. J. (2022). Effect of solar drying methods on proximate composition, sugar profile and organic acids of mango varieties in Tanzania. Applied Food Research, 2(2), Article 100140. DOI: https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100140

123. Muir, B. (2022). Sugar beet processing to sugars. In Sugar: Production, Consumption and Health Implications. Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2730-0_42

124. Nguyen, T. T., Hoang, Q. T., Nguyen, T. T., Pham, T. A., Cao, A. D., Pham, H. D., ... & Chu-Ky, S. (2022). Research and development prospects for sugarcane industry in Vietnam. Sugar Tech, 24(5), 1330–1341. DOI: https://doi.org/10.1007/s12355-022-01113-7

125. Pandey, S. C., Virmani, N., Choudhary, D., et al. (2025). Assessing industry 4.0 readiness: a TOE-P framework for the sugar industry in developing economies. Discovery Sustainability, 6, Article 384. DOI: https://doi.org/10.1007/s43621-025-01212-x

126. Raj, S. P., Srinivas, M., Sravya, B., O'Donovan, T. S., & Reddy, K. S. (2021). Design of tunnel drier for the non-centrifugal sugar industry. International Journal of Low-Carbon Technologies, 16(2), 407–416. DOI: https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa075

127. Ramachandran, R. P., Nadimi, M., Cenkowski, S., et al. (2024). Advancement and innovations in drying of biopharmaceuticals, nutraceuticals, and functional foods. Food Engineering Reviews, 16, 540–566. DOI: https://doi.org/10.1007/s12393-024-09381-7

128. Ramadan, N. H. (2023). A review on sugarcane harvesting technology. Journal of Agricultural Engineering, 54(3).

129. Singh, S., Srivastava, S. K., & Jangirala, S. (2025). System dynamics analysis of sugarcane supply chain in Indian sugar industry. Global Business Review, 26(2), 468–480. DOI: https://doi.org/10.1177/0972150921999521

130. Slavyansky, A., Mitroshina, D., Gribkova, V., Ermolaev, V., & Bondarchuk, O. (2023). Beet pulp of sugar production and prospects for its use. Vestnik MGTU, 26(3), 292–303. DOI: https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-3-292-303

131. Sobulska, M., & Zbicinski, I. (2020). Advances in spray drying of sugar-rich products. Drying Technology, 39(12), 1774–1799. DOI: https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1832513

132. Sulaiman, A., Arsyad, M., Amiruddin, A., Teshome, T., & Nishantha, B. (2023). New trends of sugarcane cultivation systems toward sugar production on the free market: A review. AGRIVITA Journal of Agricultural Science, 45(2), 395–406. DOI: https://doi.org/10.17503/agrivita.v45i2.4066

133. Tait, P., Blanco, A., & Fanning, M. (2010). The implementation of a dryer/cooler conversion and short residence time conditioning system for refined sugar. International Sugar Journal, 112(1339), 464–470.

134. Ahmed, J., Dhull, S. B., & Dwivedi, M. (2023). Innovative processing technologies for lentil flour, protein, and starch. In J. Ahmed, M. Siddiq, & M. A. Uebersax (Eds.), Lentils: Production, Processing, and Dietary Health. Wiley. DOI: https://doi.org/10.1002/9781119866923.ch12

135. Ahmed, S., Rehman, H., & Ahmed, N. (2024). Potato starch extraction: Techniques, challenges, and future opportunities. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 13(4), 512–524. DOI: https://doi.org/10.22271/phyto.2024.v13.i4f.15046

136. Bitencourt, B. S., Guedes, J. S., Maniglia, B. C., Castanha, N., Rojas, M. L., & Augusto, P. E. D. (2024). Novel processing technologies to enhance starch functionality. In Starch in Food: Structure, Function, and Applications (pp. 213–233). Academic Press. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96102-8.00019-X

137. García, M., et al. (2008). Innovations in starch-based film technology. In G. F. Gutiérrez-López et al. (Eds.), Food Engineering: Integrated Approaches (pp. 453–463). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-387-75430-7_32

138. Gongora, I. G., Dunoyer, A. T., Martinez, S. E. Q., & Zapateiro, L. A. G. (2025). Physicochemical and technological properties of the starch from corn (Zea mays) variety P-7928. Current Research in Nutrition and Food Science, 13(1). DOI: http://dx.doi.org/10.12944/CRNFSJ.13.1.35

139. Gulzar, S., Narciso, J. O., Elez-Martínez, P., Martín-Belloso, O., Soliva-Fortuny, R., & Soliva-Fortuny, R. (2023). Recent developments in the application of novel technologies for the modification of starch in light of 3D food printing. Current Opinion in Food Science, 52, Article 101067. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cofs.2023.101067

140. Hussain, S., Akhter, R., & Maktedar, S. S. (2024). Advancements in sustainable food packaging: From eco-friendly materials to innovative technologies. Sustainable Food Technology, 2, 1297–1315. DOI: https://doi.org/10.1039/d4fb00084f

141. Maniglia, B. C., Castanha, N., Rojas, M. L., & Augusto, P. E. D. (2021). Emerging technologies to enhance starch performance. Current Opinion in Food Science, 37, 26–36. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.09.003

142. Maniglia, B. C., Polachini, T. C., Norwood, E. A., Le-Bail, P., & Le-Bail, A. (2021). Thermal technologies to enhance starch performance and starchy products. Current Opinion in Food Science, 40, 72–80. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.01.005

143. Mriachenko, N., Iurchenko, S., & Cheremska, T. (2016). The substantiation of development of mousses technology using wheat starch. Food Science and Technology, 10(4). DOI: https://doi.org/10.15673/fst.v10i4.255

144. Sridhar, K., Sharma, M., & Inbaraj, B. S. (2024). Functional clean-label starch: Sustainable production technologies and food applications. Starch, 76(11-12), Article 2400157. DOI: https://doi.org/10.1002/star.202400157

145. Sun, Y., Wang, Z., Ye, J., Li, Y., Wang, L., & Cao, R. (2025). Advances in starch-based nanocomposites for functional food systems: Harnessing AI and nuclear magnetic resonance technologies for tailored stability and bioactivity. Foods, 14(5), Article 773. DOI: https://doi.org/10.3390/foods14050773

146. Ushakov, D., Shepelev, V., & Patlasov, O. (2020). Innovative technologies of modified starch production. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 488, Article 012032. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012032

147. Wang, L., & Tong, L. (2024). Production and properties of starch: Current research. Molecules, 29(3), Article 646. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules29030646

148. Yudhistira, B., Husnayain, N., Punthi, F., Gavahian, M., Chang, C. K., & Hsieh, C. W. (2024). Progress in the application of emerging technology for the improvement of starch-based active

packaging properties: A review. ACS Food Science & Technology, 4(9), 1997–2012. DOI: https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00260

149. Adi Sulianto, A., Adiyaksa, I. P., Wibisono, Y., Khan, E., Ivanov, A., Drannikov, A., et al. (2023). From fruit waste to hydrogels for agricultural applications. Clean Technologies, 6(1), 1–17. DOI: https://doi.org/10.3390/cleantechnol6010001

150. Amaraweera, S. M., Gunathilake, C., Gunawardene, O. H. P., Fernando, N. M. L., Wanninayaka, D. B., Dassanayake, R. S., ... & Manipura, A. (2021). Development of starch-based materials using current modification techniques and their applications: A review. Molecules, 26(22), Article 6880. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules26226880

151. Amaraweera, S. M., Gunathilake, C., Gunawardene, O. H. P., Dassanayake, R. S., Fernando, N. M. L., Wanninayaka, D. B., ... & Manipura, A. (2022). Preparation and characterization of dual-modified cassava starch-based biodegradable foams for sustainable packaging applications. ACS Omega, 7(23), 19579–19590. DOI: https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01292

152. Dong, M., Mastroianni, G., Bilotti, E., Zhang, H., & Papageorgiou, D. G. (2024). Sustainable materials and engineering: Future prospects for starch composites. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 12(29), 11056–11066. DOI: https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c04198

153. Fatima, S., Khan, R. M., Ahmad, I., & Sadiq, M. B. (2024). Recent advances in modified starch based biodegradable food packaging: A review. Heliyon, 10(6), Article e27453. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27453

154. Gurunathan, M. K., Navasingh, R. J. H., Selvam, J. D. R., et al. (2025). Development and characterization of starch bioplastics as a sustainable alternative for packaging. Scientific Reports, 15, Article 15264. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-00221-0

155. Jiang, T., Duan, Q., Zhu, J., Liu, H., & Yu, L. (2020). Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 3(1), 8–18. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.003

156. Liu, D., Zhao, P., Chen, J., Yan, Y., & Wu, Z. (2022). Recent advances and applications in starch for intelligent active food packaging: A review. Foods, 11(18), Article 2879. DOI: https://doi.org/10.3390/foods11182879

157. Nguyen, T. L., Ora, A., Häkkinen, S. T., et al. (2024). Innovative extraction technologies of bioactive compounds from plant by-products for textile colorants and antimicrobial agents. Biomass Conversion and Biorefinery, 14, 24973–25002. DOI: https://doi.org/10.1007/s13399-023-04726-4

158. Onyeaka, H., Obileke, K., Makaka, G., & Nwokolo, N. (2022). Current research and applications of starch-based biodegradable films for food packaging. Polymers, 14(6), Article 1126. DOI: https://doi.org/10.3390/polym14061126

159. Punia Bangar, S., Whiteside, W. S., Suri, S., Barua, S., & Phimolsiripol, Y. (2023). Native and modified biodegradable starch-based packaging for shelf-life extension and safety of fruits/vegetables. International Journal of Food Science and Technology, 58(2), 862–870. DOI: https://doi.org/10.1111/ijfs.16219

160. Usman, I., Hussain, M., Imran, A., Afzaal, M., Saeed, F., Javed, M., ... & Saewan, S. A. (2022). Traditional and innovative approaches for the extraction of bioactive compounds. International Journal of Food Properties, 25(1), 1215–1233. DOI: https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2074030

161. Zhong, H., Chen, Z., Han, Y., & Hu, K. (2025). The molecular mechanisms and new classification of resistant starch – A review. Current Research in Food Science, 10, Article 101023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.101023

162. Ametefe, G., & Orji, F. (2024). Pectin classifications, mode of action and factors influencing pectinase production. Journal of Agricultural, Food Science and Biotechnology, 2(1), 36–53. DOI: https://doi.org/10.58985/jafsb.2024.v02i01.35

163. Chandel, V., Biswas, D., Roy, S., Vaidya, D., Verma, A., & Gupta, A. (2022). Current advancements in pectin: Extraction, properties and multifunctional applications. Foods, 11(17), Article 2683. DOI: https://doi.org/10.3390/foods11172683

164. Gavahian, M., Mathad, G. N., Pandiselvam, R., Lin, J., & Sun, D.-W. (2021). Emerging technologies to obtain pectin from food processing by-products: A strategy for enhancing resource efficiency. Trends in Food Science & Technology, 115, 42–54. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.018

165. Haque, S. M., Kabir, A., Ratemi, E., Elzagheid, M., Appu, S. P., Ghani, S. S., & Sarief, A. (2025). Greener pectin extraction techniques: Applications and challenges. Separations, 12(3), Article 65. DOI: https://doi.org/10.3390/separations12030065

166. Khubber, S., Kazemi, M., Amiri Samani, S., Lorenzo, J. M., Simal-Gandara, J., & Barba, F. J. (2021). Structural-functional variability in pectin and effect of innovative extraction methods: An integrated analysis for tailored applications. Food Reviews International, 39(4), 2352–2377. DOI: https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1952422

167. Macias-Frotto, B., Escobedo-Avellaneda, Z., Welti-Chanes, J., & Rostro-Alanís, M. (2024). Conventional and innovative methods for pectin extraction from agro-industrial by-products. Food Engineering Reviews, 17(1), 161–188. DOI: https://doi.org/10.1007/s12393-024-09390-6

168. Marić, M., Grassino, A. N., Zhu, Z., Barba, F. J., Brnčić, M., & Brnčić, S. R. (2018). An overview of the traditional and innovative approaches for pectin extraction from plant food wastes and by-products: Ultrasound-, microwaves-, and enzyme-assisted extraction. Trends in Food Science & Technology, 76, 28–37. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.022

169. Nabiyeva, Z., Zhexenbay, N., Iskakova, G., Kizatova, M., & Akhmetsadykova, S. (2021). Development of dairy products technology with application low-etherificated pectin products. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(11 (111)), 17–27. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.233821

170. Panchev, I., Kirchev, N., & Kratchanov, C. (2007). Improving pectin technology: II. Extraction using ultrasonic treatment. International Journal of Food Science and Technology, 23(4), 337–341.

171. Sharma, N., Pooja, & Yadav, S. K. (2022). Conventional and emerging novel techniques for the extraction of pectin and applications of pectin. Austin Journal of Biotechnology & Bioengineering, 9(1), Article 1115.

172. Subbiah, G., Verma, A., Ganesan, S., Kushwaha, R., Upadhye, V., Jena, Anshuman., & K., Kamakshi. (2025). Innovative food engineering strategies for pectin extraction: Enhancing efficiency, sustainability, and industrial applications. ACS Food Science & Technology, 5. DOI: https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.5c00090

173. Vakilian, K., Nateghi, L., Javadi, A., & Anarjan, N. (2024). Characterization of extracted pectins from the ripe grape pomace using both ultrasound-assisted and conventional extraction techniques (Preprint). Research Square. DOI: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4898643/v1

174. Yapias, R. J. M., Areche, F. O., Calderón, G. D. L. C., Franco, L. E. Y., Yajahuanca, L. T., Fierro, Y. E. C., Poma, W. A. C., & Rodriguez, A. R. (2025). Optimized extraction of high-purity pectin from orange biowaste using synergistic ultrasound-microwave-assisted green technologies. Current Research in Nutrition and Food Science, 13(2). DOI: http://dx.doi.org/10.12944/CRNFSJ.13.2.01

175. Yapias, R. J. M., et al. (2025). Optimized extraction of high-purity pectin from orange biowaste using synergistic ultrasound-microwave-assisted green technologies. Nutrition and Food Science, 13(2).

176. Abdellah, F. (2024). Therapeutic properties of honey and propolis. IntechOpen. DOI: http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.1006858

177. Alburaki, M., Madella, S., & Corona, M. (2021). RFID technology serving honey bee research: A comprehensive description of a 32-antenna system to study honey bee and queen behavior. Applied System Innovation, 4(4), Article 88. DOI: https://doi.org/10.3390/asi4040088

178. Barmak, R., Stefanec, M., Hofstadler, D., Piotet, L., Schönwetter-Fuchs-Schistek, S., Mondada, F., ... & Mills, R. (2023). A robotic honeycomb for interaction with a honeybee colony. Science Robotics, 8(76), Article eadd7385. DOI: http://dx.doi.org/10.1126/scirobotics.add7385

179. Blumenthal, T., & Erturk, E. (2024). Information technology and data analytics for beekeeping and beehive health. Journal of Information Science, 8(4), 36. DOI: http://dx.doi.org/10.57675/IMIST.PRSM/ijist-v8i4.303

180. Chirsanova, A., Capcanari, T., Boistean, A., & Mehdi, I. (2021). Bee honey: History, characteristics, properties, benefits and adulteration in the beekeeping sector. Journal of Social Sciences, 4(3), 98–114. DOI: http://dx.doi.org/10.52326/jss.utm.2021.4(3).11

181. Gadge, A. S., Shirsat, D. V., Soumia, P. S., Pote, C. L., Pushpalatha, M., Pandit, T. R., ... & Karuppaiah, V. (2024). Physiochemical, biological, and therapeutic uses of stingless bee honey. Frontiers in Sustainable Food Systems, 7, Article 1324385. DOI: http://dx.doi.org/10.3389/fsufs.2023.1324385

182. Grekov, A., Grekova, N., Solomakhin, M., Lykhin, D., & Levina, M. (2021). Increasing efficiency of honey extracting through innovative technology as exemplified by a small agricultural producer. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 845, Article 012088. DOI: http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012088

183. Gupta, A. K., et al. (2019). Honey bee network in Africa co-creating a grassroots innovation ecosystem in Africa (ZEF Working Paper Series No. 178). University of Bonn.

184. Kek, S. P., Chin, N., Tan, S. W., Yusof, Y. A., & Chua, L. S. (2017). Classification of honey from its bee origin via chemical profiles and mineral content. Food Analytical Methods, 10, 1–12. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s12161-016-0544-0

185. Kurdin, I., & Kurdina, A. (2025). Internet of Things smart beehive network: Homogeneous data, modeling, and forecasting the honey robbing phenomenon. Inventions, 10(2), Article 23. DOI: https://doi.org/10.3390/inventions10020023

186. Luo, X. D., Gu, Y., Zhang, C., Ma, X., & Haile. (2021). Review processing technologies for bee products: An overview of recent developments and perspectives. Frontiers in Nutrition, 8, Article 727181. DOI: http://dx.doi.org/10.3389/fnut.2021.727181

187. Maicelo-Quintana, J. L., Reyna-Gonzales, K., Balcázar-Zumaeta, C. R., Auquiñivin-Silva, E. A., Castro-Alayo, E. M., Medina-Mendoza, M., ... & Maldonado-Ramirez, I. (2024). Potential application of bee products in food industry: An exploratory review. Heliyon, 10(1), Article e24056. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24056

188. Ogwu, M. C., & Izah, S. C. (2025). Honey as a natural antimicrobial. Antibiotics, 14(3), Article 255. DOI: https://doi.org/10.3390/antibiotics14030255

189. Phiri, B. J., Fèvre, D., & Hidano, A. (2022). Uptrend in global managed honey bee colonies and production based on a six-decade viewpoint, 1961–2017. Scientific Reports, 12, Article 21298. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-25290-3

190. Sandrock, C., Wohlfahrt, J., Brunner, W., et al. (2024). Efficacy and trade-offs of an innovative hyperthermia device to control Varroa destructor in honeybee colonies. Journal of Pest Science, 97, 1433–1450. DOI: https://doi.org/10.1007/s10340-023-01709-2

191. Vallone, M., Orlando, S., Alleri, M., Ferro, M. V., & Catania, P. (2023). Honey production with remote smart monitoring system. Chemical Engineering Transactions, 102, 169–174. DOI: http://dx.doi.org/10.3303/CET23102029

192. Ziegler, C., Sinigaglia, T., Martins, M. E. S., & Souza, A. M. (2021). Technological advances to reduce Apis mellifera mortality: A bibliometric analysis. Sustainability, 13(15), Article 8305. DOI: https://doi.org/10.3390/su13158305

193. Angelin, M., Kumar, J., Vajravelu, L. K., Satheesan, A., Chaithanya, V., & Murugesan, R. (2024). Artificial sweeteners and their implications in diabetes: A review. Frontiers in Nutrition, 11, Article 1411560. DOI: https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1411560

194. Ashwell, M., Gibson, S., Bellisle, F., et al. (2020). Expert consensus on low-calorie sweeteners: Facts, research gaps and suggested actions. Nutrition Research Reviews, 33(1), 145–154. DOI: https://doi.org/10.1017/S0954422419000283

195. Chattopadhyay, S., Raychaudhuri, U., & Chakraborty, R. (2014). Artificial sweeteners - a review. Journal of Food Science and Technology, 51(4), 611–621. DOI: https://doi.org/10.1007/s13197-011-0571-1

196. Hernández-Pérez, A. F., Jofre, F. M., Queiroz, S., de Arruda, P. V., Chandel, A. K., & de Almeida Felipe, M. G. (2020). Biotechnological production of sweeteners. In M. L. Verma & A. K. Chandel (Eds.), Biotechnological Production of Bioactive Compounds (pp. 261–292). Elsevier. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64323-0.00009-6

197. Hong, Q. Y., Huang, Y., Yang, J., Su, L. T., Dai, Z. R., & Zhao, C. F. (2025). Food sweeteners: Angels or clowns for human health? Current Research in Food Science, 10, Article 101032. DOI: https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.101032

198. Jurcevic Zidar, B., Knezovic, Z., Pribisalic, A., Luetic, S., Jurcic, K., Knezovic, N., & Sutlovic, D. (2025). Consumer perceptions of artificial sweeteners in food products, consumption frequency, and body mass index: A multivariate analysis. Nutrients, 17, 814. DOI: https://doi.org/10.3390/nu17050814

199. Kakleas, K., Christodouli, F., & Karavanaki, K. (2020). Nonalcoholic fatty liver disease, insulin resistance, and sweeteners: A literature review. Expert Review of Endocrinology & Metabolism, 15(2), 83–93. DOI: https://doi.org/10.1080/17446651.2020.1740588

200. Li, J., Li, H., Liu, H., & Luo, Y. (2023). Recent advances in the biosynthesis of natural sugar substitutes in yeast. Journal of Fungi, 9, 907. DOI: https://doi.org/10.3390/jof9090907

201. Milano, E., Geraldo, A. P. G., Kraemer, M. V. S., Ares, G., de Barros, B. V., Chaddad, M. C. C., ... & Proença, R. P. C. (2025). Declaration of sweeteners on food labels: A scoping review of methodological issues and prevalence. Nutrition Reviews, 83(7), e1881–e1895. DOI: https://doi.org/10.1093/nutrit/nuae175

202. More, T. A., Sheikh, Z., & Ali, A. (2021). Artificial sweeteners and their health implications: A review. Bioscience Biotechnology Research Asia, 18(2). DOI: https://doi.org/10.13005/bbra/2910

203. Muñoz-Labrador, A., Hernandez-Hernandez, O., & Moreno, F. J. (2023). A review of the state of sweeteners science: The natural versus artificial non-caloric sweeteners debate. Critical Reviews in Biotechnology, 44(6), 1080–1102. DOI: https://doi.org/10.1080/07388551.2023.2254929

204. Poshala, K. (2020). Artificial Sweeteners: A Review. International Journal of Research in Pharmaceutical Sciences, 11(2), 27416–27421.

205. Russell, C., Grimes, C., Baker, P., Sievert, K., & Lawrence, M. A. (2021). The drivers, trends and dietary impacts of non-nutritive sweeteners in the food supply: A narrative review. Nutrition Research Reviews, 34(2), 185–208. DOI: https://doi.org/10.1017/S0954422420000268

206. Sayas-Barberá, E., Paredes, C., Salgado-Ramos, M., Pallarés, N., Ferrer, E., de Vera, C. N. R., & Pérez-Álvarez, J. Á. (2024). Approaches to enhance sugar content in foods: Is the date palm fruit a natural alternative to sweeteners? Foods, 13(1), 129. DOI: https://doi.org/10.3390/foods13010129

207. Wang, C., Liu, Y., Zhao, X., & Liu, B. (2022). Current advances and future aspects of sweetener synergy: Properties, evaluation methods and molecular mechanisms. Applied Sciences, 12, 5096. DOI: https://doi.org/10.3390/app12105096

208. Xie, H., Jiao, Q., Li, H., Ye, H., Ren, G., Huang, M., & Yang, T. (2025). Artificial intelligence-assisted identification and screening strategies in sweetener design. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1–16. DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2025.2516136

209. Zhang, G., Zhang, L., Ahmad, I., Zhang, J., Zhang, A., Tang, W., ... & Lyu, F. (2022). Recent advance in technological innovations of sugar-reduced products. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 64(15), 5128–5142. DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2151560

210. Angelin, M., Kumar, J., Vajravelu, L. K., Satheesan, A., Chaithanya, V., & Murugesan, R. (2024). Artificial sweeteners and their implications in diabetes: A review. Frontiers in Nutrition, 11, Article 1411560. DOI: https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1411560

211. Ashwell, M., Gibson, S., Bellisle, F., et al. (2020). Expert consensus on low-calorie sweeteners: Facts, research gaps and suggested actions. Nutrition Research Reviews, 33(1), 145–154. DOI: https://doi.org/10.1017/S0954422419000283

212. Chattopadhyay, S., Raychaudhuri, U., & Chakraborty, R. (2014). Artificial sweeteners - a review. Journal of Food Science and Technology, 51(4), 611–621. DOI: https://doi.org/10.1007/s13197-011-0571-1

213. Hernández-Pérez, A. F., Jofre, F. M., Queiroz, S., de Arruda, P. V., Chandel, A. K., & de Almeida Felipe, M. G. (2020). Biotechnological production of sweeteners. In M. L. Verma & A. K. Chandel (Eds.), Biotechnological Production of Bioactive Compounds (pp. 261–292). Elsevier. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64323-0.00009-6

214. Hong, Q. Y., Huang, Y., Yang, J., Su, L. T., Dai, Z. R., & Zhao, C. F. (2025). Food sweeteners: Angels or clowns for human health? Current Research in Food Science, 10, Article 101032. DOI: https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.101032

215. Jurcevic Zidar, B., Knezovic, Z., Pribisalic, A., Luetic, S., Jurcic, K., Knezovic, N., & Sutlovic, D. (2025). Consumer perceptions of artificial sweeteners in food products, consumption frequency, and body mass index: A multivariate analysis. Nutrients, 17, 814. DOI: https://doi.org/10.3390/nu17050814

216. Kakleas, K., Christodouli, F., & Karavanaki, K. (2020). Nonalcoholic fatty liver disease, insulin resistance, and sweeteners: A literature review. Expert Review of Endocrinology & Metabolism, 15(2), 83–93. DOI: https://doi.org/10.1080/17446651.2020.1740588

217. Li, J., Li, H., Liu, H., & Luo, Y. (2023). Recent advances in the biosynthesis of natural sugar substitutes in yeast. Journal of Fungi, 9, 907. DOI: https://doi.org/10.3390/jof9090907

218. Milano, E., Geraldo, A. P. G., Kraemer, M. V. S., Ares, G., de Barros, B. V., Chaddad, M. C. C., ... & Proença, R. P. C. (2025). Declaration of sweeteners on food labels: A scoping review of methodological issues and prevalence. Nutrition Reviews, 83(7), e1881–e1895. DOI: https://doi.org/10.1093/nutrit/nuae175

219. More, T. A., Sheikh, Z., & Ali, A. (2021). Artificial sweeteners and their health implications: A review. Bioscience Biotechnology Research Asia, 18(2). DOI: https://doi.org/10.13005/bbra/2910

220. Muñoz-Labrador, A., Hernandez-Hernandez, O., & Moreno, F. J. (2023). A review of the state of sweeteners science: The natural versus artificial non-caloric sweeteners debate. Critical

Reviews in Biotechnology, 44(6), 1080–1102. DOI: https://doi.org/10.1080/07388551.2023.2254929

221. Poshala, K. (2020). Artificial Sweeteners: A Review. International Journal of Research in Pharmaceutical Sciences, 11(2), 27416–27421.

222. Russell, C., Grimes, C., Baker, P., Sievert, K., & Lawrence, M. A. (2021). The drivers, trends and dietary impacts of non-nutritive sweeteners in the food supply: A narrative review. Nutrition Research Reviews, 34(2), 185–208. DOI: https://doi.org/10.1017/S0954422420000268

223. Sayas-Barberá, E., Paredes, C., Salgado-Ramos, M., Pallarés, N., Ferrer, E., de Vera, C. N. R., & Pérez-Álvarez, J. Á. (2024). Approaches to enhance sugar content in foods: Is the date palm fruit a natural alternative to sweeteners? Foods, 13(1), 129. DOI: https://doi.org/10.3390/foods13010129

224. Wang, C., Liu, Y., Zhao, X., & Liu, B. (2022). Current advances and future aspects of sweetener synergy: Properties, evaluation methods and molecular mechanisms. Applied Sciences, 12, 5096. DOI: https://doi.org/10.3390/app12105096

225. Xie, H., Jiao, Q., Li, H., Ye, H., Ren, G., Huang, M., & Yang, T. (2025). Artificial intelligence-assisted identification and screening strategies in sweetener design. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1–16. DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2025.2516136

226. Zhang, G., Zhang, L., Ahmad, I., Zhang, J., Zhang, A., Tang, W., ... & Lyu, F. (2022). Recent advance in technological innovations of sugar-reduced products. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 64(15), 5128–5142. DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2151560

227. Abd El-Hack, M. E., El-Saadony, M. T., Shafi, M. E., Zabermawi, N. M., Arif, M., Batiha, G. E., ... & Al-Sagheer, A. A. (2020). Antimicrobial and antioxidant properties of chitosan and its derivatives and their applications: A review. International Journal of Biological Macromolecules, 164, 2726–2744. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.153

228. Abdl Aali, R. A. K., & Al-Sahlany, S. T. G. (2024). Gellan gum as a unique microbial polysaccharide: Its characteristics, synthesis, and current application trends. Gels, 10(3), Article 183. DOI: https://doi.org/10.3390/gels10030183

229. Ahmad, S., Ahmad, M., Manzoor, K., Purwar, R., & Ikram, S. (2019). A review on latest innovations in natural gums based hydrogels: Preparations & applications. International Journal of Biological Macromolecules, 136, 870–890. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.113

230. Alizadeh Sani, M., Ehsani, A., Moghaddas kia, E., & Khezerlou, A. (2019). Microbial gums: Introducing a novel functional component of edible coatings and packaging. Applied Microbiology and Biotechnology, 103, 6855–6866. DOI: https://doi.org/10.1007/s00253-019-09966-x

231. Eghbaljoo, H., Sani, I. K., Sani, M. A., Rahati, S., Mansouri, E., Molaee-Aghaee, E., ... & Jafari, S. M. (2022). Advances in plant gum polysaccharides: Sources, techno-functional properties, and applications in the food industry - A review. International Journal of Biological Macromolecules, 222(Part B), 2327–2340. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.10.020

232. Jurasek, P., Varga, S., & Phillips, G. O. (1995). Classification of natural gums. VII. Relationships between the series Vulgares (Acacia senegal) and Gummiferae (Acacia seyal). Food Hydrocolloids, 9(1), 17–34. DOI: https://doi.org/10.1016/S0268-005X(09)80190-2

233. Martínez-Burgos, W. J., Ocán-Torres, D. Y., Manzoki, M. C., Scapini, T., Mello, A., Pozzan, R., ... & Soccol, C. R. (2024). New trends in microbial gums production, patented technologies and applications in food industry. Discover Food, 4, Article 49. DOI: https://doi.org/10.1007/s44187-024-00130-7

234. Miao, W., Jiang, H., Li, X., Sang, S., Jiang, L., Lin, Q., ... & Qiu, C. (2023). Recent advances in natural gums as additives to help the construction and application of edible biopolymer gels: The example of hydrogels and oleogels. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 64(33), 12702–12719. DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2256006

235. Saha, A., Tyagi, S., Gupta, R. K., & Tyagi, Y. K. (2017). Natural gums of plant origin as edible coatings for food industry applications. Critical Reviews in Biotechnology, 37(8), 959–973. DOI: https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1286449

236. Ahankari, S. S., Subhedar, A. R., Bhadauria, S. S., & Dufresne, A. (2021). Nanocellulose in food packaging: A review. Carbohydrate Polymers, 255, Article 117479. DOI: https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2020.117479

237. Alam, M., Greco, A., Corcione, C., Jimenez, A., & Garrigós, M. (2024). Microwave-assisted extraction of cellulose from waste olive wood powder using deep eutectic solvents (Preprint). Research Square. DOI: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4720873/v1

238. Asghari-Varzaneh, E., & Shekarchizadeh, H. (2024). Fascinating properties and applications of nanocellulose in the food industry. In Nanocellulose - Recent Advances and Future Perspectives. IntechOpen. DOI: https://doi.org/10.5772/intechopen.114085

239. Bin Bakri, M. K., & Rahman, M. R. (2022). Extraction, types, and classification of cellulose. In M. R. Rahman (Ed.), Fundamentals and Recent Advances in Nanocomposites Based on Polymers and Nanocellulose (pp. 19–40). Elsevier. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85771-0.00003-8

240. Cao, H., Ding, X., Ao, S., Huang, W., Wang, S., Li, F., ... & Liu, S. (2025). Cellulose-based biomass foams for food packaging: Current trends and future challenges. Trends in Food Science & Technology, 163, Article 105185. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105185

241. Deng, Y., Zhu, T., Cheng, Y., et al. (2024). Recent advances in functional cellulose-based materials: Classification, properties, and applications. Advanced Fiber Materials, 6, 1343–1368. DOI: https://doi.org/10.1007/s42765-024-00454-0

242. Franco, T. S., de Muniz, G. B., Lomelí-Ramírez, M. G., Rangel, B. S., Jiménez-Amezcua, R. M., Mijares, E. M., ... & Rentería-Urquiza, M. (2023). Nanocellulose and its application in the food industry. Biology and Life Sciences Forum, 28(1), Article 2. DOI: https://doi.org/10.3390/blsf2023028002

243. Pivovarov, O. A., Kovaleva, O. S., & Chursinov, J. O. (2020). Prevention of biofouling of industrial reverse water supply systems by plasma water treatment. In Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resources: Book of abstracts of the 3rd International Scientific and Technical Internet Conference (pp. 50–52). UNIVERSITAS Publishing.

244. Garg, T., Arora, S., & Pahwa, R. (2025). Cellulose and its derivatives: Structure, modification, and application in controlled drug delivery. Future Journal of Pharmaceutical Sciences, 11. DOI: https://doi.org/10.1186/s43094-025-00834-2

245. Kargarzadeh, H., Ioelovich, M., Ahmad, I., Thomas, S., & Dufresne, A. (2018). Recent developments in nanocellulose-based biodegradable polymers, thermosetting polymers, and their composites for various applications. Polymers, 10(10), Article 1203. DOI: https://doi.org/10.3390/polym10101203

246. Kassab, Z., et al. (2023). Structure and properties of cellulose and its derivatives. In R. Khiari, M. Jawaid, & M. N. Belgacem (Eds.), Annual Plant: Sources of Fibres, Nanocellulose and Cellulosic Derivatives. Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-2473-8_15

247. Kaur, J., & Ubeyitogullari, A. (2025). Recent advances in the utilization of cellulose from food processing byproducts for the generation of aerogels. Gels, 11(5), Article 359. DOI: https://doi.org/10.3390/gels11050359

248. Kovaliova, O., Pivovarov, O., Vasylieva, N., & Koshulko, V. (2022). Obtaining of rice malt with the use of plasma-chemically activated aqueous solutions. Food Science and Technology, 16(4), 64–76. DOI: https://doi.org/10.15673/fst.v16i4.2542

249. Kovaliova, O., Vasylieva, N., Stankevych, S., Zabrodina, I., Mandych, O., Hontar, T., Haliasnyi, I., Kotliar, O., Yanchyk, O., Bogatov, O. (2023). Development of a technology for the production of germinated flaxseed using plasma-chemically activated aqueous solutions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (11 (124)), 6–19. doi: DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.284810

250. Kovalova, O., Vasylieva, N., Stankevych, S., Zabrodina, I., Haliasnyi, I., Gontar, T., Kotliar, O., Gavrish, T., Gill, M., Karatieieva, O. (2023). Determining the effect of plasmochemically activated aqueous solutions on the bioactivation process of sea buckthorn seeds. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (11 (122)), 99–111. doi: DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.275548

251. Kovalova, O., Vasylieva, N., Dikhtyar, A., Andrieieva, S., Omelchenko, S., Kotliar, O., Kariyk, A., Rudakov, S., Harbuz, S., Onyshchenko, L. (2024). Development of oat malt production technology using plasma-chemically activated aqueous solutions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (11 (131)), 80–91. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.311477

252. Kovalova, O., Vasylieva, N., Zhulinska, O., Balandina, I., Zhukova, L., Bezpal'ko, V., Horiainova, V., Trybrat, R., Zazymko, O., & Barkar, Y. (2024). Development of lentil malt production technology using plasma-chemically activated aqueous solutions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(11 (130), 76–86. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.308298

253. Kovalova, O., Vasylieva, N., Haliasnyi, I., Gavrish, T., Dikhtyar, A., Andrieieva, S., Gontar, T., Osmanova, O., Omelchenko, S., & Ashtaiev, O. (2024). Development of technology for the production of all-purpose buckwheat malt using plasmochemically activated aqueous solutions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(11 (127), 38–51. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298797

254. Kovaliova, O., Pivovarov, O., & Koshulko, V. (2020). Study of hydrothermal treatment of dried malt with plasmochemically activated aqueous solutions. Food Science and Technology, 14(3), 113–121. DOI: https://doi.org/10.15673/fst.v14i3.1799

255. Kovalova, O. S., Chursinov, Y. O., & Kofan, D. D. (2018). Research of hydrothermal processing of dry barley malt. Grain Products and Mixed Fodders, 18(4), 13–18. DOI: https://doi.org/10.15673/gpmf.v18i4.1190

256. Mu, R., Hong, X., Ni, Y., Li, Y., Pang, J., Wang, Q., ... & Zheng, Y. (2019). Recent trends and applications of cellulose nanocrystals in food industry. Trends in Food Science & Technology, 93, 136–144. DOI: https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2019.09.013

257. Raza, M. (2025). Fabrication of cellulose-based hydrogels through ionizing radiation for environmental and agricultural applications. Gels, 11, Article 604. DOI: https://doi.org/10.3390/gels11080604

258. Sabbaghi, H. (2023). Cellulose in food production – Principles and innovations. IntechOpen. DOI: https://doi.org/10.5772/intechopen.109204

259. Seddiqi, H., Oliaei, E., Honarkar, H., et al. (2021). Cellulose and its derivatives: Towards biomedical applications. Cellulose, 28, 1893–1931. DOI: https://doi.org/10.1007/s10570-020-03674-w

260. Shahaban, O. P. S., Khasherao, B. Y., Shams, R., Dar, A. H., & Dash, K. K. (2024). Recent advancements in development and application of microbial cellulose in food and non-food

systems. Food Science and Biotechnology, 33(7), 1529–1540. DOI: https://doi.org/10.1007/s10068-024-01524-0

261. Toptunov, E., & Sevastyanova, Y. (2021). Powdered cellulosic materials: Overview, classification, characteristics and fields of application. Chemistry of Plant Raw Material, 31–45. DOI: https://doi.org/10.14258/jcprm.2021049186

262. Tshwafo, M. (2021). Recent applications and innovations of cellulose based materials: A critical review. Cellulose Chemistry and Technology, 55(1-2). DOI: https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2021.55.01

263. Varqani, N., & Bastian, F. (2023). Review: Utilization of cellulose in food products. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1230, Article 012039. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1230/1/012039

264. Wang, Z., Li, S., Zhao, X., Liu, Z., Shi, R., Hao, M., & Hao, M. (2025). Applications of bacterial cellulose in the food industry and its health-promoting potential. Food Chemistry, 464(Part 2), Article 141763. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141763

265. Yibing, Z., Sun, D.-W., & Xu, L. (2025). Bacterial cellulose-driven sustainable food packaging innovations: Biosynthesis, functionalization, and applications. Trends in Food Science & Technology, 163, Article 105167. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105167

Навчальне видання
(українською мовою)

Півоваров Олександр Андрійович
Ковальова Олена Сергіївна
Тертишний Олег Олександрович
Кошулько Віталій Сергійович

Інноваційні технології у виробництві цукристих речовин та продуктів харчування

Навчальний посібник

Друкується в авторській редакції
Відповідальний за випуск О. О. Тертишний
Комп'ютерна верстка О. С. Обдимко

Оформлення згідно зі стандартами книговидання

Підписано до друку 30.03.2026 р. Формат 60х84 1/16. Папір офсетний.
Друк цифровий. Ум.-друк. арк. 36,39. Обл.-вид. арк. 36,62.
Наклад 50 прим. Зам. № 03/26

Видавництво ФОП Обдимко,
м. Дніпро, вул. Уральська, 17
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 6033 від 20.02.2018 р.
Віддруковано ФОП Обдимко
49008, м. Дніпро, вул. Національної Гвардії, 17

