

**ЗЕМЛЕРОБСЬКА МЕХАНІКА**

---

**AGRICULTURAL MECHANICS**

ISBN 978-617-627-174-1



**4**

**Землеробська механіка**

ДНІПРОВСЬКИЙ  
ДЕРЖАВНИЙ  
АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

1922-2022  
**100**

DNIPRO  
STATE  
AGRARIAN AND ECONOMIC  
UNIVERSITY

---

**ЗЕМЛЕРОБСЬКА  
МЕХАНІКА**

**4** TOM  
volume

**AGRICULTURAL  
MECHANICS**

---

**100-річчю Дніпровського Державного  
Аграрно-економічного Університету  
20-річчю кафедри технології зберігання і  
переробки сільськогосподарської продукції  
присвячується**

# **ЗЕМЛЕРОБСЬКА МЕХАНІКА**



**ДДАЕУ**

# **AGRICULTURAL MECHANICS**

**Dedicated to the  
100th anniversary of the  
Dnipro State Agrarian and Economic University**

**МІНІСТРЕСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Дніпровський державний аграрно - економічний університет**

**А.С. Кобець, С.П. Сокол, А.М. Пугач, Ю.О. Чурсінов, О.А. Півоваров,  
С.Ю. Миколенко, О.С. Ковальова, В.С. Калина, В.С. Кошулько,  
Д.О. Тимчак, Н.А. Сова, К.А. Худайбердієва**

# **ЗЕМЛЕРОБСЬКА МЕХАНІКА**

**Том 4**

**Інноваційні технології  
харчових виробництв**

**Дніпро**

**2022**

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
Dnipro State Agrarian and Economic University**

**A.S. Kobets, S.P. Sokol, A.M. Puhach, Y.O. Tchursinov, O.A. Pivovarov,  
S.Y. Mukolenko, O.S. Kovalova, V.S. Kalyna, V.S. Koshulko, D.O. Tymchak,  
N.A. Sova, K.A. Khudaiberdiieva**

# **AGRICULTURAL MECHANICS**

**Volume 4**

**Innovative technologies of  
food production**

**Dnipro**

**2022**

**3**

УДК 664.01

I-66

Землеробська механіка. Інноваційні технології харчових виробництв / А.С. Кобець, С.П. Сокол, А.М. Пугач, Ю.О. Чурсінов, О.А. Півоаров, С.Ю. Миколенко, О.С. Ковальова, В.С. Калина, В.С. Кошулько, Д.О. Тимчак, Н.А. Сова, К.А. Худайбердієва. Дніпро: «Свідлер А. Л.», 2022. Том 4. 460 с.

Обговорюються інноваційні технології у харчових виробництвах, зокрема сучасні технологічні заходи, направлені на ефективне виробництво різноманітної харчової продукції, впроваджуючи результати науково-дослідних і практичних досліджень колективом кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції. Особливу увагу приділено технологіям виробництва біологічно активних добавок на основі рослинної сировини, а саме: соку люцерна та амаранту; екструдуванию сумішей зелених кормів та сої; особливостям фізико-хімічних процесів в умовах контактної нерівноважної низькотемпературної плазми; застосуванню обробленої плазмою води у хлібопеченні та солодо-рощенні; виробництву функціональних харчових продуктів; конструктивно-технологічним параметрам обладнання для сепарування продуктів лущення вівса віброударним методом; комплексній переробці насіння промислових конопель.

Під загальною редакцією д.т.н., проф. **Півоарова О.А.**

*Рецензенти:*

**Осокіна Н.М.**, доктор сільськогосподарських наук, професор кафедри технології зберігання і переробки зерна Уманського національного державного університету садівництва;

**Науменко О.П.**, доктор технічних наук, професор кафедри інноваційної інженерії Державного вищого навчального закладу «Український державний хіміко-технологічний університет»;

**Самойчук К.О.**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обладнання переробних і харчових виробництв імені професора Ф.Ю. Ялпачика Таврійського державного аграрно-технологічного університету імені Дмитра Моторного;

**Олексієнко В.О.**, кандидат технічних наук, доцент кафедри обладнання переробних і харчових виробництв імені професора Ф.Ю. Ялпачика Таврійського державного аграрно-технологічного університету імені Дмитра Моторного.

Рекомендовано до видання Вченою радою Дніпровського державного аграрно-економічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол №1 від 20.09.2021 р.).

ISBN 978-617-627-174-1

© Кобець А.С., Сокол С.П., Пугач А.М.,  
Чурсінов Ю.О., Півоаров О.А.,  
Миколенко С.Ю., Ковальова О.С.,  
Калина В.С., Кошулько В.С., Тимчак Д.О.,  
Сова Н.А., Худайбердієва К.А.,  
2022

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕДМОВА.....</b>	<b>9</b>
<b>Розділ 1. ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА БІОЛОГІЧНО АКТИВНИХ ДОБАВОК ІЗ СОКУ ЛЮЦЕРНИ ТА АМАРАНТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКСТРУДУВАННЯ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ.....</b>	<b>13</b>
1.1. Аналіз технологічних та інженерних рішень проблеми .....	15
1.1.1. Структурно-функціональний аналіз комплексного технологічного процесу .....	16
1.1.2. Загальна модель технологічного процесу .....	20
1.1.2.1. Скошування та доставка вегетативної зеленої маси .....	27
1.1.2.2. Подрібнення сировини та будова блок-схеми алгоритму.....	34
1.1.2.3. Вологе фракціонування сировини.....	41
1.1.2.4.Сушіння віджимок у рухомому шарі.....	53
1.1.2.5 Змішування віджимок з кормовими компонентами.....	59
1.1.2.6. Брикетування сумішей .....	66
1.2. Коагуляція соку люцерни та амаранту.....	77
1.3. Розділення коагулята фільтрацією та центрифугуванням .....	87
1.4. Сушіння біологічно активних кормових добавок.....	91
1.5. Оцінка впливу режимів технологічного процесу на якість біологічно активних речовин .....	98
1.6. Екструдкування зернових сумішей зелених кормів та сої.....	105
1.6.1.Загальна характеристика виробництва зернових і зернорослинних екструдатів.....	105
1.6.2.Загальні принципи екструдкування сумішей.....	106
1.6.3. Характеристика рослинної сировини як об'єкта для виробництва екструдатів та екструдкування .....	109
1.6.4. Структурна схема матеріальних потоків виробництва екструдатів.....	114
1.6.5. Характеристика рослинних екструдатів .....	114
1.7. Опис технологічного процесу виробництва екструдатів.....	122
1.7.1. Виробництво зернорослинних екструдатів з біологічно активними добавками .....	122
1.7.2. Основні технологічні параметри процесу виробництва екструдатів.....	125
1.7.3. Контроль якості процесу екструдкування.....	126
1.7.4. Пропозиції щодо будови технологічних модулів екструдкування зернових, зернорослинних і соєбобових матеріалів .....	128

1.8. Висновки .....	129
<b>Розділ 2. КОНТАКТНА НЕРІВНОВАЖНА НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНА ПЛАЗМА (КНП): ОСОБЛИВОСТІ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В УМОВАХ КНП.....</b>	<b>131</b>
2.1. Термодинамічний та кінетичний аналізи хімічних перетворень під дією контактної нерівноважної плазми .....	135
2.2. Термодинаміка хімічних процесів.....	139
2.3. Компоненти плазми в плазмохімічному реакторі. Хімічні реакції атомів, молекул та іонів.....	151
2.4. Термодинамічний аналіз накопичення поліоксиду водню .....	168
2.5. Взаємозв'язок енергетики плазмового розряду з хімічним складом рідкого катода.....	172
2.6. Висновки .....	183
<b>Розділ 3. ЗАСТОСУВАННЯ ОБРОБЛЕНОЇ ПЛАЗМОЮ ВОДИ В ХЛІБОПЕЧЕННІ В КОНТЕКСТІ ПРОДОВОЛЬЧОЇ БЕЗПЕКИ .....</b>	<b>184</b>
3.1. Продовольча безпека: аспекти раціонального використання продовольчої сировини.....	184
3.2. Використання плазмохімічно активованої води у хлібопеченні для підвищення якості продукції .....	192
3.3. Біотестування плазмохімічно активованої води як харчової сировини.....	209
3.4. Висновки .....	221
<b>Розділ 4. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ТА БІОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ СОЛОДОРОЩЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ, ОБРОБЛЕНИХ КОНТАКТНОЮ НЕРІВНОВАЖНОЮ ПЛАЗМОЮ .....</b>	<b>223</b>
Висновки .....	264
<b>Розділ 5. РОЗРОБКА НОВИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПРОДУКТІВ ХАРЧОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....</b>	<b>265</b>
5.1. Стан і перспективи виробництва функціональних харчових продуктів та їх роль у життєдіяльності організму людини .....	265
5.1.1. Хімічний склад та технологічні властивості інгредієнтного складу функціональних продуктів .....	266
5.2. Обґрунтування доцільності розробки нового продукту та введення його на ринок.....	286
5.2.1. Розробка анкети та анкетування споживачів .....	286
5.2.2. Розробка концепції нового продукту .....	287
5.2.3. Формування споживчої моделі якості харчового продукту .....	288
5.2.4. Представлення нового харчового продукту за методом «фокус-група». Розробка робочих листів учасника фокус-групи .....	289

5.3. Вплив технологічних параметрів при виробництві продукту .....	289
5.3.1. Макаронні вироби на основі клітковини гречаної .....	289
5.3.2. Фруктово-овочеві гранули в системі натрію альгінат–кальцію фосфат .....	293
5.3.3. Кремово-збивні цукерки, збагачені бджолиним обніжжям .....	296
5.3.4. Шоколадні тістечка на основі бобової культури – нут .....	299
5.3.5. Кондитерські вироби з біологічно активними речовинами .....	302
5.3.6. Кондитерські вироби дієтично-діабетичного призначення.....	307
5.4. Висновки .....	311

## **Розділ 6. НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СЕПАРУВАННЯ ПРОДУКТІВ ЛУЩЕННЯ ЗЕРНА ВІВСА ВІБРОУДАРНИМ МЕТОДОМ..... 312**

6.1. Загальні поняття та аналіз технічних засобів для віброударної сепарації зерна .....	313
6.1.1. Поняття та класифікація методів сепарування зернових сумішей .....	314
6.1.2 Поняття про подільність зернових сумішей .....	318
6.1.3 Технологічний ефект сепарування зернових сумішей.....	321
6.1.4. Аналіз конструкцій віброфрикційних сепараторів.....	326
6.2. Теоретичне обґрунтування поділу продуктів лущення зерна вівса за сукупністю фізико-механічних властивостей.....	332
6.2.1. Опис технологічного процесу роботи падді-машини .....	334
6.2.2. Математичне моделювання процесу сепарування сипких матеріалів.....	336
6.2.3. Математичне обґрунтування процесу сепарування на падді- машині.....	340
6.2.4. Визначення параметрів, що впливають на процес, та розробка параметричної схеми .....	347
6.2.5. Розробка функціональної схеми процесу віброударного сепарування .....	349
6.3. Методика експериментальних досліджень.....	350
6.3.1. Установка падді-машини та методика проведення досліджень .....	350
6.3.2. Методика вимірювання досліджуваних величин, прилади та обладнання.....	353
6.3.3. Вибір факторів варіювання .....	355
6.4. Результати експериментальних досліджень сепарування продуктів лущення зерна вівса та їх обговорення.....	361



6.4.1. Процес завантаження та розподілу сировини живильником ...	361
6.4.2. Вплив амплітуди та частоти коливань на процес сепарування вівса .....	366
6.4.3. Характеристика процесу сепарування .....	369
6.4.4. Вплив динамічної нерівномірності коливань робочого столу на процес сепарування .....	370
6.5. Висновки .....	372
<b>Розділ 7. НАУКОВІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ КОМПЛЕКСНОЇ ПЕРЕРОБКИ НАСІННЯ ПРОМИСЛОВИХ КОНОПЕЛЬ .....</b>	<b>375</b>
7.1. Особливості щодо вітчизняних сортів конопель та технологій їх виращування .....	375
7.2. Особливості складу насіння промислових конопель .....	379
7.3. Склад та показники якості насіння промислових конопель вітчизняної селекції .....	382
7.3.1. Показники якості насіння промислових конопель сорту Глесія .....	383
7.3.2. Показники якості насіння промислових конопель сорту Гляна .....	386
7.4. Технологічні параметри оброщування насіння промислових конопель .....	389
7.4.1. Визначення впливу технологічних параметрів процесу оброщування на чистоту ядра .....	389
7.4.2. Визначення впливу технологічних параметрів процесу оброщування на вихід ядра .....	397
7.4.3. Характеристика готового продукту – конопляного ядра .....	406
7.5. Параметри процесу вилучення олії з насіння промислових конопель .....	411
7.5.1. Показники якості пресової конопляної олії .....	416
7.5.2. Жирно-кислотний склад пресової конопляної олії .....	418
7.6. Показники якості сипких конопляних продуктів .....	421
7.7. Розробка технологічної схеми комплексної переробки насіння промислових конопель .....	425
7.8. Висновки .....	429
<b>БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ .....</b>	<b>432</b>

## ПЕРЕДМОВА

Якщо йдеться про інноваційні технології у харчовій промисловості, то це означає, що велика кількість наукових досягнень у будь-якій галузі виробництва має втілюватися, відповідати вимогам сучасності та бути спрямована на покращення життєвих стандартів. Складна, але благородна задача, і той, хто наполегливо працює над вирішенням подібних проблем, заслуговує на особливу повагу і визнання.

Сьогодні, коли світ стрімголов змінюється, коли клімат непередбачено та несподівано починає підносити сюрпризи (повені, урагани, шторми, посухи, вивітрювання родючого шару землі, тайння льодовиків та багато іншого), з якими людство майже ніколи не стикалося в таких масштабах, коли епідеміологічний стан є загрозою не тільки для здоров'я, але і для життя людей на планеті, коли якість харчування і водопостачання стають суттєвою проблемою, виникає глобальна відповідальність перед населенням з постачання принципово нових і якісних харчових продуктів, адаптованих і збалансованих до вимог часу. Вочевидь це стосується фахівців харчової галузі, бо зрозуміло: якщо виробництво буде спиратися на застарілі технології, обладнання та ідеології, то на людство чекає колапс з непомірними втратами людей, тварин, всього живого.

Читачеві запропоновані результати досліджень – і це лише крапелька в сучасній технологічній революції харчового виробництва, але саме з таких краплинок утворюються струмочки, які набувають нового змісту й вигляду – потоки, що стають тим джерелом, яким користуються люди, впевнені в безпеці від вживання великого різноманіття харчових продуктів. Матеріали, що представлені в книзі, наскрізь пронизані саме цією ідеєю – дати населенню якісну, безпечну і корисну їжу, створити оптимальні умови її виробництва з використанням сучасного технологічного обладнання і новітніх технологій.

Монографія до видання підготовлена за ініціативи кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції:

розділ 1 – д.н.держ.упр., професор Кобець А.С.,  
д.т.н., професор Чурсінов Ю.О.;

розділ 2 – д.т.н., професор Піоваров О.А.,  
д.н.держ.упр., професор Пугач А.М.;

розділ 3 – д.т.н., професор Піоваров О.А.,  
к.т.н., доцентка Миколенко С.Ю.;

розділ 4 – д.т.н., професор Піоваров О.А.,  
к.т.н., доцентка Ковальова О.С.;

розділ 5 – к.т.н., доцентка Калина В.С.,  
д.н.держ.упр., професор Пугач А.М.;

розділ 6 – к.т.н., доцент Кошулько В.С., викладач Тимчак Д.О.;

розділ 7 – к.т.н., доцентка Сова Н.А., к.т.н., доцент Сокол С.П.,  
асистентка Худайбердієва К.А.

## **BACKGROUND**

When it comes to innovative technologies in the food industry, it means that a large number of scientific achievements in any field of production should be implemented, meet the requirements of modernity and be aimed at improving living standards. A difficult but noble task, and those who work hard to solve such problems deserve special respect and recognition.

Today, when the world is changing rapidly, when the climate unforeseenly and unexpectedly begins to present surprises (floods, hurricanes, storms, droughts, weathering of the fertile layer of the earth, melting of glaciers and much more), which humanity has almost never faced on such a scale, when the epidemiological situation is a threat not only to health, but also to the lives of people on the planet, when the quality of food and water supply becomes a significant problem, there is a global responsibility to the population to supply fundamentally new and high-quality food products, adapted and balanced to the requirements of the time. Obviously, this concerns the specialists of the food industry, because it is clear: if production is based on outdated technologies, equipment and ideologies, then humanity will collapse with exorbitant losses of people, animals, all living things.

The reader is offered the results of research - and this is only a drop in the modern technological revolution of food production, but it is from such drops that streams are formed, which acquire a new meaning and appearance - streams that become the source used by people who are confident in the safety of consuming a wide variety of food products. The materials presented in the book are permeated with this idea - to provide the population with high-quality, safe and healthy food, to create optimal conditions for its production using modern technological equipment and the latest technologies.

The monograph was prepared on the initiative of the Department of Technology of Storage and Processing of Agricultural Products:

Section 1 – Doctor of Science in Public Administration, Professor Kobets A.S.,  
Doctor of Technical Sciences, Professor Chursinov Y.O.;

- Section 2 – Doctor of Technical Sciences, Professor Pivovarov O.A.,  
Doctor of Science in Public Administration, Professor  
Puhach A.M.;
- Section 3 – Doctor of Technical Sciences, Professor Pivovarov O.A.,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Mykolenko S.Y.;
- Section 4 – Doctor of Technical Sciences, Professor Pivovarov O.A.,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Kovalova O.S.;
- Section 5 – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Kalyna V.S.,  
Doctor of Science in Public Administration,  
Professor Puhach A.M.;
- Section 6 – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Koshulko V.S., Lecturer Tymchak D.O.;
- Section 7 - PhD, Associate Professor Sova N.A., PhD, Associate Professor  
Sokol S.P., assistant Khudaiberdieva K.A.

## **Розділ 1. ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА**

### **БІОЛОГІЧНО АКТИВНИХ ДОБАВОК ІЗ СОКУ ЛЮЦЕРНИ ТА АМАРАНТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКСТРУДУВАННЯ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ**

Стале збільшення обсягів виробництва продукції тваринництва і птахівництва неможливо забезпечити без створення міцної кормової бази в усіх спеціалізованих галузевих і міжгосподарських об'єднаннях та середніх і дрібних господарствах шляхом подальшої інтенсифікації кормовиробництва, широкого освоєння індустріальних технологій у комбікормовій промисловості. Кормовиробництво розвивається в основному за двома напрямками: перший – удосконалення технології та обладнання на підприємствах, які забезпечують повнораціонними комбікормами промислове птахівництво і тваринництво; другий – виробництво комбікормів і кормових сумішей у малогабаритних комбікормових цехах з використанням власної сировини, білково-вітамінних добавок (БВД), мінеральних добавок, а також преміксів промислового виробництва.

У зв'язку з якісними і структурними змінами поголів'я сільськогосподарських тварин і птиці стратегія комбікормових підприємств щодо виробництва і просування на ринок своєї продукції вимагає гнучкості та швидких технологічних і технічних рішень. На жаль, ця галузь орієнтується лише на внутрішнього споживача, що значно обмежує її розвиток.

Особливої гостроти нині набуває проблема дефіциту білка та біологічно активних речовин у кормах для тварин та птиці, тож природними є пошуки нових технологічних рішень для його заповнення.

Найважливішу роль для виробництва тваринного білка відіграють поновлювані корми рослинного походження, які значною мірою є джерелами білкових кормів і білкових добавок. Серед них: біомаса люцерни, амаранту, конюшини лугової, горохово-вівсяних сумішей, люпину, листя капусти і буряку тощо.

Дійсно, якість білка цих кормів, особливо амаранту і люцерни, незрівнян-

но вища, ніж якість білка зернофуражних культур. За амінокислотним складом він близький до білків тваринного походження і є кращим від білка соєвого шроту – основного замітника білків тваринного походження в стартерних раціонах годівлі молодняку великої рогатої худоби, свиней та птиці.

Про доцільність збільшення частки білка зернобобових культур і трав у загальному балансі свідчить незрівнянно більший вихід перетравного протеїну з гектара у цих культур порівняно зі зернофуражними. Наприклад, збір протеїну з гектара посівів сої в 2 рази вище, ніж з гектара кукурудзи, і в 3–4 рази вище, ніж з гектара будь-яких інших зернових культур, а з гектара амаранту і люцерни його збирають в 2–3 рази більше, ніж з гектара сої.

Розглядали технології отримання протеїну і біологічно активних речовин, в яких використовували тільки листову масу, а клітковина, тобто стебла, йшла на виробництво кормів для жуйних тварин.

Викладені у цій монографії процеси і методи вивільнення протеїну та біологічно активних речовин з біомаси рослин засновані на використанні методів «механічного фракціонування зелених рослин», які дозволяють розкрити сутність та перспективи цього напрямку, отримати якісно нові багаті на білок кормові добавки.

Процес виробництва біологічно активних білкових добавок зводиться до скошування рослинної біомаси, подрібнення її на технологічних лініях, та віджимання (механічного фракціонування) для отримання з неї трав'яного соку і жому, які можуть використовуватися у свіжому, сушеному або консервованому вигляді для годування жуйних тварин. Сік піддається підкисленню, тепловій обробці, фільтрації, сушці, в результаті чого отримують біологічно активні добавки (БАД), які значно поліпшують раціони кормів, забезпечуючи їх збалансованим вмістом каротину, багатьох вітамінів та активних речовин, необхідних для життєдіяльності та росту тварин і птахів.

## 1.1. Аналіз технологічних та інженерних рішень проблеми

Технологія виробництва біологічно активних речовин ґрунтується на механічному пресуванні (зневодненні) зелених рослин і подальшій переробці твердої і рідкої фракцій (жому і соку) в основні та побічні корми. Технологічні можливості проілюстровані на схемі процесу фракціонування (рис. 1.1).

Теоретичні, лабораторні та експериментальні роботи над проблемою добування злистя і стебел, почалися наприкінці 60-х років ХХ ст. (Новиков, 1979; Пири, 1980). Згодом виробництво біологічно активних добавок з рослин активно почалося в багатьох країнах.



Рис.1.1. Схема процесу фракціонування

Різні варіанти технологічних рішень дозволяють отримувати із зелених рослин такі цінні корми, як біологічно активні добавки, жом, сік, білкову пасту, коричневий сік; на основі цих продуктів виробляють рідкі кормові дріжджі, заміники цільного молока, сінаж, різні рідкі та сухі збагачені суміші, екструдат збагачений білковими добавками екструдат.

У порівнянні з традиційними технологіями заготівлі трав очевидними перевагами представленої нами технології є такі:

- скорочення втрат поживних речовин у кормах;
- перерозподіл і концентрація речовин в абсолютно різних нових видах кормів: білка – в біологічно-активних добавках, а клітковини – в жомі, що дозволяє цілеспрямовано вводити той чи інший вид корму моногастричним або іншим видам тварин чи птиці;



- усунення «транзитних» втрат білка у зв'язку з надмірно високим його вмістом у літніх раціонах – шляхом вилучення його при фракціонуванні на зелений сік і жом з подальшим приготуванням БАД і субпродуктів, якими годують тварин переважно зимою;

- усунення «транзитних» втрат ксантофілу – пігменту, цінного для птаківництва і не обов'язкового для жуйних тварин – шляхом його перерозподілу в БАД, які з у складі стартерних сумішей згодують переважно птиці і молоднятку тварин.

### **1.1.1. Структурно-функціональний аналіз комплексного технологічного процесу**

Сутність технології полягає у використанні вологого фракціонування для одержання із різних видів зелених рослин соків і цінних білкових концентратів, які застосовуються в годуванні тварин як замітники білків тваринного походження. Технологія виробництва біологічно активних речовин (добавок), починаючи від переробки вихідної маси і закінчуючи готовим кормом, включає ряд складних взаємопов'язаних процесів, кожний з яких у більшій чи меншій мірі впливає на її кінцевий результат, якість виробленого корму, його кількість і на енерговитрати. Головним слід вважати процес механічного зневоднення рослинної маси (вологе фракціонування на жом і сік), в результаті якого відбувається поділ технологічного потоку на дві лінії переробки фракції. Допоміжними процесами є: скошування зеленої маси, її транспортування до стаціонарної лінії, дозування, подрібнення, транспортні операції між етапами переробки, пакування і відвантаження готової продукції.

Аналіз технологій і способів виробництва біологічно активних добавок, процесів і обладнання для їх реалізації (рис. 1.2) показує, що для всіх технологічних рішень властивими є такі основні етапи:

- збирання біологічного врожаю і доставка його з поля;
- завантаження і подрібнення зеленої маси;
- вологе фракціонування на жом і сік;

- очищення соку і його коагуляція або хімічна обробка;
- виділення білкового згустка і отримання коричневого соку (фільтрату, відстояної рідини);
- сушіння білкової пасти різними способами або її консервування;
- переробка жому в гранульовані брикетовані корми або закладка в сінаж;
- переробка коричневого соку на дріжджі, його згущення або виробництво з нього лікувальних препаратів.

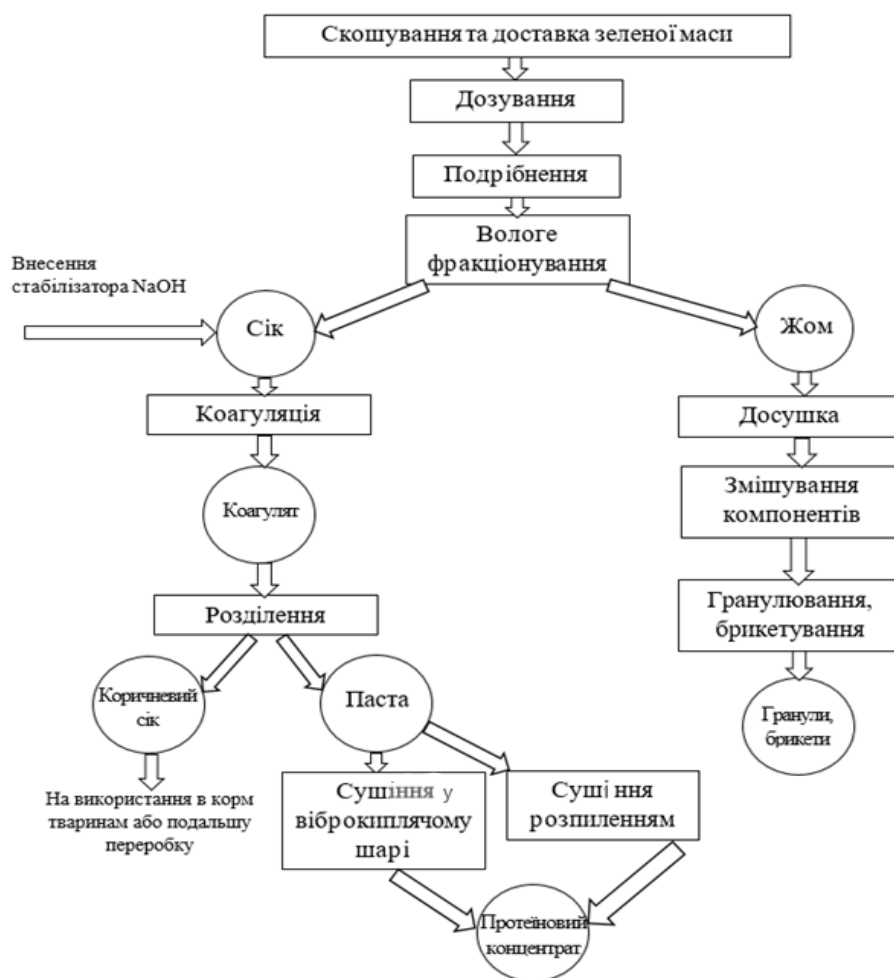


Рис. 1.2. Структурно-функціональна схема технологічної системи виробництва протеїнових кормів на основі вологого фракціонування зелених рослин

Процеси цієї технологічної системи взаємопов'язані між собою і відбуваються таким чином, що вихідні параметри одного з процесів є вхідними для наступного. Причому функціонування такої технологічної системи, яке полягає у виконанні низки операцій зі сировиною, що переробляється, тісно пов'язане не тільки з важливістю основних процесів, в економічному і якісному перетворенні сировини в готову продукцію, а й зі значимістю допоміжних процесів і операцій. Серйозні порушення в одному з допоміжних процесів можуть значно вплинути на кінцевий результат.

Із двох технологічних потоків, утворених на стадії вологого фракціонування, потік переробки жому включає декілька процесів:

- 1) досушування тепловими методами або активним вентиляванням;
- 2) змішування жому з іншими кормовими компонентами і брикетування або гранулювання суміші;
- 3) виробництво з жому сінажу або силосованих кормів (для варіантів закладки жому на зберігання із застосуванням методів консервування).

Переробка соку включає ряд складних процесів, що вимагають значних енерговитрат і в більшій мірі впливають на якісний і кількісний вихід кінцевого продукту – біологічно активних добавок. До таких процесів відносять:

- 1) коагуляцію білків соку рослин та біологічно активних речовин;
- 2) поділ коагулянту на БАД і фільтрат коричневий сік (КС);
- 3) сушіння пасти розпиленням або у віброкиплячому шарі залежно від вимог виробництва або побажань замовника.

Одержуваний після розділення коагуляту, коричневий сік (КС) є відходом виробництва і використовується у тваринництві як рідка добавка для приготування вологих мішанок або як рідина при виготовленні кормових дріжджів: тому процес його використання чи переробки віднесено до побічних.

Процеси, які окремо або взаємозв'язку між собою впливають на основні якісні та кількісні показники технологічного потоку, кінцевого продукту переробки, а також на енергетичні показники всього технологічного комплексу, є головними. Розділення процесів за їх функціональним призначенням та засоба-

ми реалізації, режимами роботи і рівнем регулювання, дозволяє точніше уявити складну технологічну структуру взаємозв'язків. Виходом кожного з процесів загального технологічного комплексу є проміжний вид кормового матеріалу. У свою чергу продукт попереднього процесу є сировиною для подальшого, а результатом всієї технологічної системи є продукція в кінцевому вигляді.

Так, для процесу вологого фракціонування одержаний продукт (сік або жом) може бути проміжним у разі їх подальшої переробки в пасту, концентрат чи в трав'яні гранули. Якщо ж технологія реалізується тільки для отримання соку і жому, (наприклад, на фермерській соковій лінії, то сік та жом є вже кінцевими видами продукції. Виходячи зі спрямованості технологічних ліній на той чи інший вид одержуваного корму: (сік, жом, паста, брикети, БАД), визначаються взаємозв'язок технологічних процесів, собівартість і обмінна енергія вироблених кормів, енергоємність системи у цілому.

З огляду на структурно-функціональну схему, основні процеси: вологе фракціонування, коагуляція соку, сушіння пасти і жому, брикетування та гранулювання сумішей – в цілому визначають енергоємність технологічного комплексу і якість вироблених кормів. Проте ж кожен із процесів слід вважати визначальним для отримання якісного кінцевого корму і оцінювати якість отримання продукту після кожного з них. Якщо процес вологого фракціонування в основному визначає кількісне співвідношення потоку, який розділяється на сік і жом, то процеси, пов'язані з впливом тепла на продукт, що переробляється, визначають крім кількісної ще й якісну сторону вироблених кормів. Якщо у процесі коагуляції соку параметри не відповідатимуть оптимальним, то неможливо буде забезпечити дотримання раціональних режимів на цьому етапі переробки, і в такому випадку розділення та сушіння не приведуть до отримання кінцевого продукту з високими якісними показниками. Саме тому завдання і включало пошук закономірностей функціонування процесів як окремо, так і в комплексі, визначення їх раціональних параметрів, аналіз взаємозв'язку процесів, результатом чого є висока якість корму і його максимальний кількісний вихід з мінімальними енерговитратами.

### 1.1.2. Загальна модель технологічного процесу

Найважливішим технологічним і економічним показником виробництва є якість одержуваних БАД і субпродуктів з обмеженою енергоємністю технології. Виробництво БАД і субпродуктів є складною організаційно-технічною і технологічною системою, яку можна віднести до класу великих. Для таких систем характерні загальна мета функціонування, складність, цілісність, невизначеність і необхідність її адаптивності, діалогового спілкування дослідження, наявність технолога або оператора в процесі імітаційного моделювання та реалізації системи, можливість її розвитку з метою розширення функцій і збільшення кількості числа підсистем, тобто підключення нових технічних засобів і методів.

Комплексне вирішення проблем, які виникають у процесі створення та реалізації моделі за допомогою спеціальних комп'ютерних програм, можливе в системному підході до вивчення об'єкта, коли в основу моделюючої системи закладено єдину формальну математичну схему.

Формалізація системи здійснюється за допомогою математичної моделі, що виражає зв'язок між вихідними і вхідними параметрами та параметрами стану, які керують і збурювальними змінними при заданих граничних умовах, з подальшим розв'язанням систем отриманих рівнянь, встановленням кількісної оцінки процесу, що моделюється. Для моделювання роботи системи в цілому необхідно використовувати моделі кожного процесу (агрегату) окремо. Моделювання дозволить нам визначити сумісність усіх процесів і обмежень на їх вхідні і вихідні параметри, а також «вузькі» місця у виробництві.

Основний вузол системи являє собою математичну модель технологічного комплексу, а математичний опис передусім вимагає чітко постановленої мети, знання умов і технічних можливостей реалізації. У зв'язку з цим ставляться різні вимоги до складності і точності опису. У будь-якому випадку необхідно враховувати і обґрунтовувати реальність поставлених вимог.

Кожна конкретна задача має свої особливості і вимагає використання найбільш раціональних методів розв'язання. Поряд із цим практика моделю-

вання виробила і загальні вимоги та класифікувала підходи до вирішення різних завдань.

Одним із найбільш універсальних методів випробовування важких систем (технологічних), аналізу ситуацій та керування, є блок-схема загального системного алгоритму. Система – це упорядкована сукупність певних об'єктів та зв'язків між ними, сукупний огляд яких дозволяє визначити якість, що відсутня в кожному з об'єктів окремо.

На етапі попередньої розробки і вивчення технологічного комплексу, його структури, процесів та призначення формуються завдання досліджень, визначаються умови функціонування всього комплексу.

Основними поняттями теорії систем є взаємозв'язок і поведінка, а основним завданням – розрахунок поведінки взаємозалежних об'єктів, виходячи з поведінки окремих з них. Спочатку в досліджуваній системі встановлюються загальні зв'язки між підсистемами і зовнішнім середовищем. Для формального опису функціонування системи може бути використаний відомий підхід, який базується на понятті агрегативної системи (А-схема) (Новиков и др., 1987).

Як елемент А-схеми є агрегат  $A$ , а зв'язок між ними всередині системи  $S$  і зі зовнішнім середовищем  $E$  здійснюється за допомогою оператора сполучення  $R$ .

Агрегат характеризується такими множинами: моменти часу  $T$ , вхідні сигнали  $X$  і вихідні сигнали  $Y$ , стани  $Z$ . Стан агрегату в момент часу  $t \in T$  позначається як  $z(t) \in Z$ , а вхідні і вихідні сигнали як  $x(t) \in X$  та  $y(t) \in Y$ , відповідно. Переходи агрегату зі стану  $z(t_1)$  в стан  $z(t_2)$  визначаються параметрами агрегатів  $h(t) \in H$  і вхідними сигналами  $x(t) \in X$ .

Кожен агрегат А-схеми  $A_n$  має вхідні контакти (рис.1.3), на які надходить сукупність елементарних сигналів  $x_i(t)$ ,  $i = 1, J_n$  і вихідні контакти, з яких знімається сукупність елементарних сигналів  $y_j(t)$ ,  $J = 1, J_n$ .

При побудові А-схеми вводиться ряд пропозицій щодо її функціонування:

1) взаємодія між А-схемою і зовнішнім середовищем та між агрегатами здійснюється при передачі сигналів, взаємні впливи поза механізму обміну сигналами;

2) для опису сигналу досить деякого кінцевого набору характеристик;

3) елементарні сигнали передаються незалежно один від одного по елементарних каналах;

4) до вхідного контакту підключається не більше одного елементарного каналу, до вихідного – будь-яке кінцеве число елементарних каналів;

5) зовнішнє середовище можна представити у вигляді фіктивного агрегату  $A_0$ .

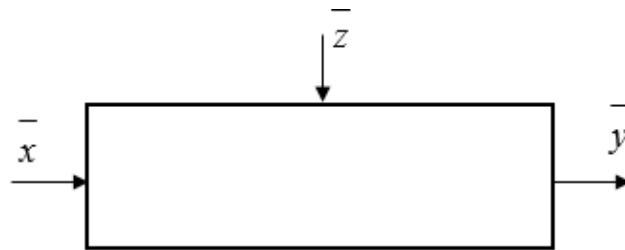


Рис.1.3. Параметрична схема агрегату А

Кожен  $A_n$  (у тому числі і  $A_0$ ) як елемент А-схеми в рамках прийнятих припущень про механізм обміну сигналами характеризується множинами вхідних контактів  $\{X_i^{(n)}\}$  та вхідних  $\{Y_l^{(n)}\}$ , де  $n = \overline{0, N_A}$ . Пара множин  $\{X_i^{(n)}\}$ ,  $\{Y_c^{(n)}\}$  є моделлю агрегату А, що використовується для формального опису сполучення з іншими агрегатами А-схеми і зовнішнім середовищем  $E$ .

Оператор сполучення  $R$  зіставляє вхідний контакт і вихідний контакт:

$$Y_c^{(k)} = R(X_i^{(n)}), k = 0, 1 \dots n.$$

Сукупність множин  $\{X_i^{(n)}\}$ ,  $\{Y_l^{(n)}\}$  і операто  $R$  утворюють схему сполучення елементів у систему  $S$ .

Структура функціонування агрегативної системи виробництва БАД і сухих кормів із жому та сумішей (рис.1.4) включає функціональне призначення агрегатів:  $A_1$  – завантаження і дозування зеленої маси на технологічну лінію;  $A_2$  – подрібнення зеленої маси;  $A_3$  – вологе фракціонування;  $A_4$  – сушіння жому;  $A_5$  – змішування кормових компонентів;  $A_6$  – брикетування (гранулювання) суміші;  $A_7$  – очищення соку від клітковини;  $A_8$  – коагуляція соку;  $A_9$  – поділ коагулята;  $A_{10}$  – сушіння пасти.

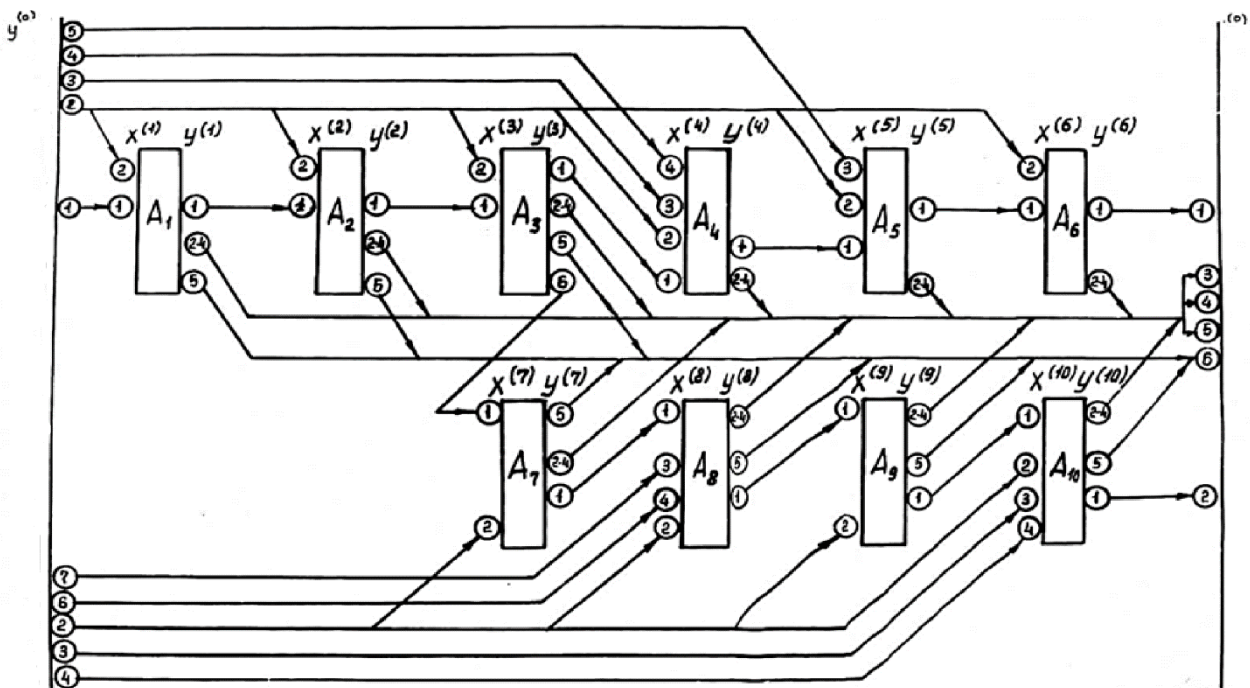


Рис.1.4. Структура агрегативної системи БАД

Конструктивно агрегат являє собою декілька об'єктів, які реалізують різні технологічні способи. Так, агрегат  $A_9$  може виконувати поділ коагуляту трьома способами: фільтрацією, центрифугуванням або відстоєм.

Послідовність вхідних і вихідних сигналів будемо називати вхідними та вихідними повідомленнями, тобто  $X$  – повідомленнями і  $Y$  – повідомленнями, відповідно. Класифікація і параметри основних повідомлень агрегативної системи БАД вказують номери агрегату і його контакту, до якого входить  $X_i^{(n)}$  –



повідомлення. Індокси  $k, l$  – номери агрегату і контакту, з якого виходить  $Y_l^{(k)}$  - повідомлення. Наявність параметра  $y$  - повідомлення зазначено знаком «+».

До таблиці не включено декілька вхідних і вихідних повідомлень. Вхідне повідомлення  $Y_2^{(0)}$  являє собою необхідну нормативну інформацію ( $X_2^{(n)}, n = 1, 2, \dots, 10$ ) за параметрами повідомлень. Вихідні повідомлення всіх агрегатів з контактів 2, 3, 4, 5 є основними.  $X$  – повідомленнями ( $X_3^{(0)}, X_4^{(0)}, X_5^{(0)}, X_6^{(0)}$ ) для аналізу ситуації, що виробничої ситуації і прийняття оперативних або оптимальних рішень по доцільною організації технологічного процесу.

Система БАД враховує такі параметри: кількість; вологість; температуру; бактеріальне забруднення; вміст білка; вміст каротину; вміст клітковини; вміст незамінних амінокислот; фракційний склад; біологічний вигляд; стадію вегетації; час від скошування до завантаження; вміст культурних домішок; засміченість; характеристику атмосферних умов; канцерогенний фон; урожайність; обмінну енергію; вміст сухої речовини; вміст сполучних; вміст цукру; реологічні властивості (пружність, в'язкість, ...); вміст безазотистих екстрактивних речовин; теплофізичні властивості (теплоємність, теплопровідність, ...); кислотність соку; фізико-механічні властивості; кількість скоагульованого білка; межу вибуховості; температуру танення; температуру самозаймання; діелектричну проникність; силу струму; щільність струму; ступінь знесолення розчину; швидкість потоку (напрямок соку при коагуляції); енергоємність; тиск.

Повідомлення  $Y_2^{(k)}, k = 1, 2, \dots, 10$  визначає санітарний стан агрегату. Повідомлення  $Y_3^{(k)}, k = 1/2, \dots, 10$  – контроль стану обладнання та якості продукції. Повідомлення  $Y_4^{(k)}, k = 1/2 \dots 10; Y_5^{(k)}, k = 1, 2, 3, 7 \dots 10$  – втрати білка і каротину.

Оператор сполучення  $R$  – для А-схеми може бути заданий на перетині рядків з номерами агрегатів  $n$  і стовпців з номерами контактів і розташовуються пари чисел  $k, l$ , які вказують номер елемента  $k$  і номер контакту  $l$ , з яким з'єднаний контакт. Значення до приведені в тексті вище.

Представлена А-схема є узагальненою структурною агрегативною математичною моделлю процесу. Для того, щоб А-схема була адекватною моделлю реального об'єкта, необхідно описати функціонування агрегатів, реальні методи передачі сигналів з урахуванням зв'язків, встановлених при системному підході. Стандартна форма подання досліджуваного об'єкта у вигляді структури агрегативної системи може слугувати основою імітаційного моделювання і дозволяє застосовувати стандартні методи обробки та аналізу результатів, тобто уніфікувати зовнішнє і внутрішнє математичне забезпечення, що розробляється.

У результаті експериментальних досліджень уточнюються постановка завдань, фізична сутність явищ, що відбуваються в процесах, і характеристика параметрів; вибираються з них істотні.

При цьому за допомогою статистичного аналізу розглядаються завдання стаціонарності і ергодичності, незалежності та взаємозв'язку параметрів, встановлюється характер зв'язку, визначаються вимоги до обсягу і якості вихідної інформації.

На підставі теоретичних основ процесу та з отриманих результатів визначається структура зв'язку вихідних і вхідних параметрів, яку за необхідності можна уточнювати на етапі моделювання, дослідної або промислової експлуатації з урахуванням реальних умов, накопичення знань і досвіду, використовуючи різні пошукові методи для оцінки коефіцієнтів моделі .

Аналіз моделі, перевірка її стійкості, роботоздатності та адекватності є перехідним етапом, який визначає завершеність роботи над створенням моделі або повернення до процесу уточнення. У процесі моделювання вирішуються завдання аналізу і синтезу. Завдання аналізу вивчають властивості і ефективність функціонування системи, залежність від структури технологічних зв'язків між елементами і підсистемами, а також від значень конструкційних і технологічних параметрів системи і технологічних режимів елементів. Синтез передбачає вибір структури технологічних зв'язків, значень параметрів системи на підставі заданих властивостей і показників ефективності її функціонування.

Розв'язання цих завдань вимагає певного досвіду в дослідженні технологічних комплексів, прийняття компромісних рішень, визначення стратегії переробки технологічного потоку, вибору та ідентифікації величин різної природи, що поєднуються в одній моделі.

Складний технологічний комплекс виробництва БАД є поєднанням технологічних процесів і операцій, причому кожен процес має своє цільове призначення, однак задану якість готового корму або проміжного продукту технологічного потоку можна отримати тільки в разі виконання певної сукупності окремих процесів.

Отже, розробку і вдосконалення технологічного процесу на основі системного підходу треба розглядати з урахуванням кінцевої мети всього технологічного комплексу тому вирішення проблем мети є, важливим аспектом побудови системи моделювання.

Для технологічного комплексу цільову функцію можна представити функціоналом якості  $F$ , що включає сумарні втрати поживних речовин корму (протеїну, вуглеводів, жирів тощо та його вітамінної частини, зокрема каротину), а також енерговитрати залежно від технологічних режимів функціонування процесів.

$$F = \omega_n \sum_{n=2}^{10} \Pi_n(T, x, y, z) + \omega_E \sum_{n=2}^{10} \mathcal{E}_n(T, x, y, z), \quad (1.1)$$

де  $\Pi_n$ ,  $E_n$  – втрати поживних речовин і енерговитрати в  $n$ -ому агрегаті  $A_n$  відповідно;

$\omega_n$ ,  $\omega_E$  – комплексні вагові коефіцієнти, що враховують масштаб  $\Pi_n$ ,  $E_n$  і їх вагу в цільовій функції.

Для агрегату дозування ( $A_1$ ) енерговитрати є постійною складовою, а втратами поживних речовин – можна знехтувати.

Виконання завдання полягає у виборі таких режимів функціонування процесів технології, які забезпечують мінімальні значення цільової функції при заданій продуктивності.

#### **1.1.2.1. Скошування та доставка вегетативної зеленої маси**

Однією з умов ефективного функціонування технологічного комплексу є раціональне територіальне розміщення сировинної бази і організація скошування і доставки сировини в такий спосіб, який забезпечив би безперервне завантаження лінії з мінімальними транспортними витратами. Економіко-математична модель розміщення сировинної бази міжгосподарського підприємства описана в роботах (Мельников и др., 1980; Новиков и др., 1987). Особливо важливими є умови скошування і доставки маси на технологічний комплекс.

Встановлено, що найбільше втрат поживних у зеленій масі кормових трав відбувається у перші дві години після скошування. Хоча неподрібнені рослини ще продовжують функціонувати протягом 20-30 хв., одразу після скошування втрачається тиск у тканинах, руйнуються рослинні клітини, і в результаті біохімічних змін під дією ферментів – розпад білків, амінокислот, каротину та інших речовин набуває ланцюгово характеру. Для запобігання втратам поживних речовин необхідно інактивувати руйнування ферментів, цього можна досягти зневодненням рослинної маси у найстисліші терміни після скошування. Якість доставленої з поля сировини значною мірою залежить також від температури навколишнього середовища. Якщо маса з поля накопичується на завантажувальному майданчику чи в живильнику-дозаторі або знаходиться в дорозі чи на майданчику тривалий час, то її температура, різко підвищується внаслідок біохімічних реакцій, в клітинній структурі відбувається самокоагуляція білків, під тиском бурту частина соку витікає з рослинної маси. Це призводить до різкого зниження кількості та якості вироблених кормів і насамперед біологічно активних речовин. Саме тому процесам скошування і доставки маси з поля приділяється велика увага по всьому технологічному потоку виробництва БАД. Ско-

шування маси здійснюють в оптимальні агротехнічні терміни, по досягненні вирощуваною люцерною стадії бутонізації.

Завдання збирально-транспортного комплексу включає скошування і доставку зеленої маси на технологічну лінію в такому обсязі і таким темпом, щоб від моменту скошування до моменту завантаження зеленої маси на технологічну лінію минуло не більше однієї години. На завантажувальному майданчику технологічної лінії допускається накопичення масив кількості, достатній тільки для півгодинної роботи лінії (приймаємо, що мінімальний страховий запас дорівнює об'єму одного транспортного засобу доставки маси з поля). Терміни доставки маси з поля до моменту переробки мають бути мінімальними. Ідеальним варіантом доставки зеленої маси можна вважати завантаження дозуючим транспортером з коліс. Час від моменту скошування маси в полі до її переробки складається з часу скошування і одночасного завантаження до транспортного засобу; часу доставки маси з поля на сировинний майданчик; часу очікування завантаження в живильник-дозатор і часу проходження живильника-дозатора до моменту надходження в перший з переробних агрегатів технологічної лінії – подрібнювач.

Розглянемо організацію роботи збирально-транспортного комплексу (ЗТК) зі застосуванням імітаційного моделювання системи. Складові технічні засоби найпростішого ЗТК – це комбайн-подрібнювач, живильник-накопичувач технологічної лінії і машини, які доставляють зелену масу від комбайна до дозатора. Мета моделювання в цьому випадку полягає у визначенні оптимального числа машин, які забезпечують найбільше навантаження живильника-накопичувача з мінімальними втратами.

Зі збільшенням кількості живильників (продуктивності лінії), полів, комбайнів, з урізноманітненням характеристик зеленої маси і технічних засобів, урахуванням погодних умов, змінної роботи, ремонтів обладнання імітаційне моделювання системи істотно ускладнюється.

Надана технологічна система математично може бути віднесена до класу систем масового обслуговування (СМО), основними елементами яких є вхідний

потік заявок на обслуговування, черга, обслуговуючий пристрій, вихідний потік обслугованих вимог. Вхідний потік створюють машини, що обслуговують пристрої (комбайн і живильник), з яких може утворюватися черга машин. Машини після обслуговування створюють вихідний потік, а після розвантаження у дозатора повертаються до комбайна, тобто в даному випадку має місце замкнута СМО з обмеженою кількістю заявок без пріоритетів (усі машини в однакових умовах). Дисципліна обслуговування черги СМО: першим прибув – першим обслугований.

Можливими є два модельовані варіанти роботи ЗТК: з одним комбайном і живильником-накопичувачем (рис. 1.5.) та з кількома комбайнами і живильниками з запасною ємністю (рис. 1.6).

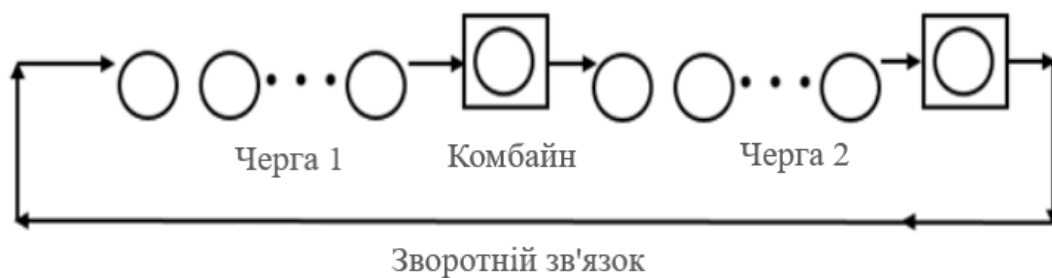


Рис. 1.5. Схема замкнутої одноканальної СМО з чергами

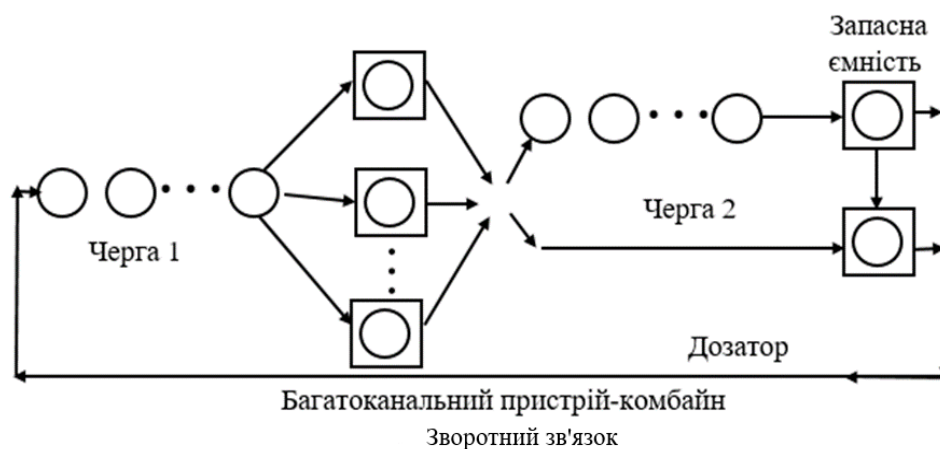


Рис. 1.6. Схема замкнутої багатоканальної СМО з чергами

Масове обслуговування включає економічний аспект: оптимальне значення критерію – функції вартості втрат. Найчастіше за критерій приймають витрати через прості технічних засобів і витрати – через очікування заявок. У нашому випадку очікування завантаженого масою транспорту призводить також до необоротних втрат якості.

Середня вартість втрат  $J(S)$  становитиме

$$J(S) = (C_1 \bar{v} + C_2 \bar{\rho} + C_3 f_p(\tau, t_i)) \tau, \quad (1.2)$$

де  $C_1$  і  $C_2$  – вартості очікування заявки і простою технічних засобів за одиницю часу;

$v$  – середнє число вільних коштів;

$\tau$  – заданий інтервал часу;

$f_p(\tau, t_i)$  – функція сумарних втрат білка в одиницю часу, що залежать від часу перебування зеленої маси з моменту скошування до її переробки і підвищення температури  $t_i$  за час  $\tau$ ; унаслідок органічних процесів;

$C_2$  – вартість втраченого білка;

$\rho$  – середнє число вільних коштів.

Аналітичні розрахунки, навіть простих систем масового обслуговування, є громіздкими, а при переході до більш складних структур практично не реалізуються.

Істотно розширилася область використання методів імітаційного моделювання, яка включає різні об'єкти дослідження (Новиков и др., 1987). Сутність імітаційного моделювання полягає в побудові моделі досліджуваної системи, що імітує в прискореному масштабі часу функціонування системи з урахуванням випадкових збурюючих факторів.

Важливу роль у проведенні імітаційного моделювання відіграє вибір мови програмування. Досвід показує, що найбільш ефективним засобом програмування імітаційних моделей є спеціальні мови. Вони дозволяють на основі

концептуального апарату мови чітко і зрозуміло описати склад, структуру і процес функціонування системи, яка моделюється, а також значно скоротити витрати на побудову моделі шляхом використання стандартних функцій імітаційної мови (рис. 1.7).

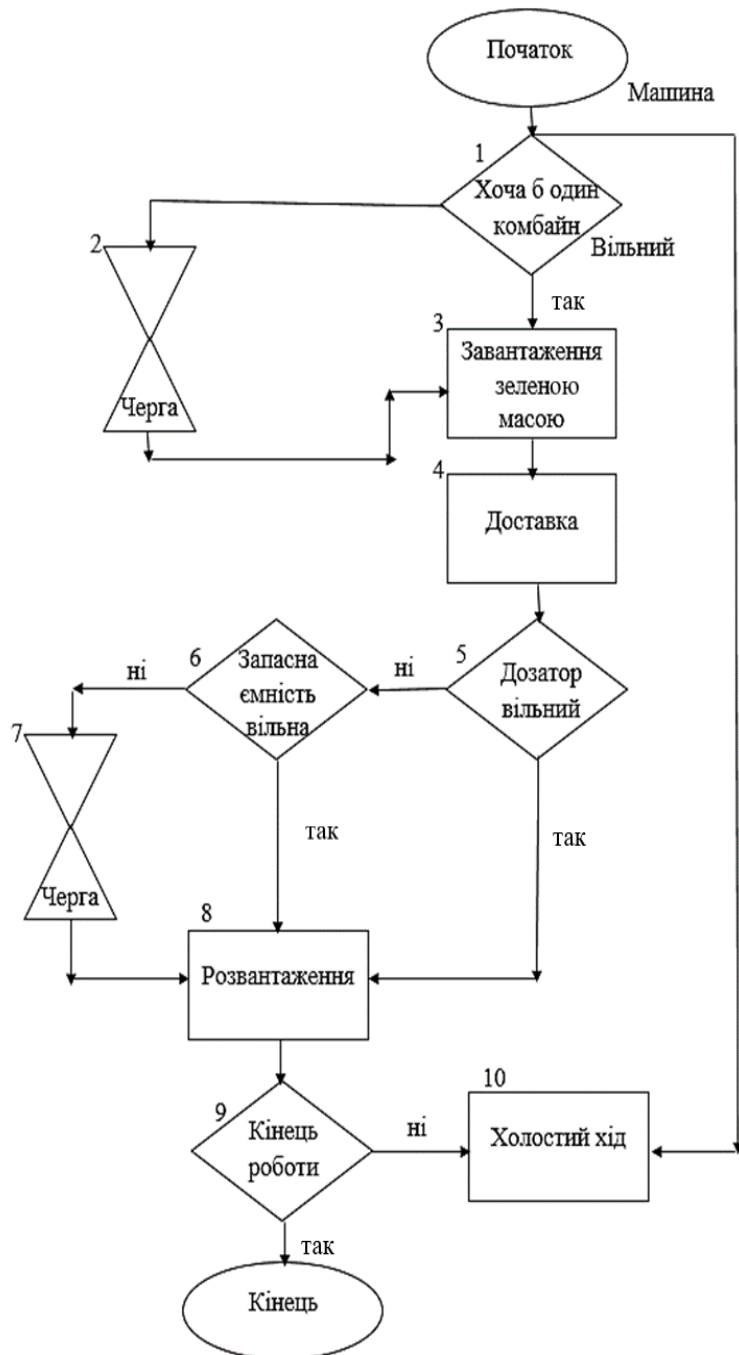


Рис. 1.7. Блок-схема алгоритму роботи ЗТК



Моделювання дозволяє отримати таку інформацію:

- для кожного збирально-транспортного засобу – частку часу зайнятості, кількість обслуговувань, середній час одного обслуговування;
- для багатоканального пристрою – загальна кількість каналів, кількість зайнятих каналів у середньому, середня завантаженість, загальна кількість входів, середній час на одне заняття;
- для черги – максимальну чергу, середнє значення черги, загальне кількість входів до черги, кількість входів без черги (нульових), середній час у черзі для загальної кількості входів, середній час у черзі без урахування нульових входів.

Результати моделювання дозволяють, згідно з поставленим завданням, визначити оптимальний варіант у кожній з розглянутих структур СМО ЗТК (варіант 1:  $m = 5$ ; варіант 2:  $m = 7$ ; варіант 3:  $m = 6$ ), а вдосконалення структури зменшує функцію вартості. Перехід від варіанта 1 до варіанта 3 дає зменшує  $I(S)$  приблизно на 2–3 %, це дає сезон значний економічний ефект навіть для найпростішого ЗТК .

Таким чином, використання імітаційного моделювання в конкретних умовах дозволяє знайти ефективні рішення для різних організаційних структур ЗТК, а застосування спеціальної мови моделювання спрощує реалізацію змін структур завдяки близькості до логіки роботи реальної системи не тільки за змістом, а й за формою.

Завдання завантаження і дозування маси – забезпечення певного темпу подачі маси транспортером шириною  $B$  шляхом зміни його  $V_{тр}$  товщини шару. Необхідну продуктивність технологічного потоку.  $Q_n$  згідно з параметричною схемою (рис. 1.8.) визначають за формулою (1.3).

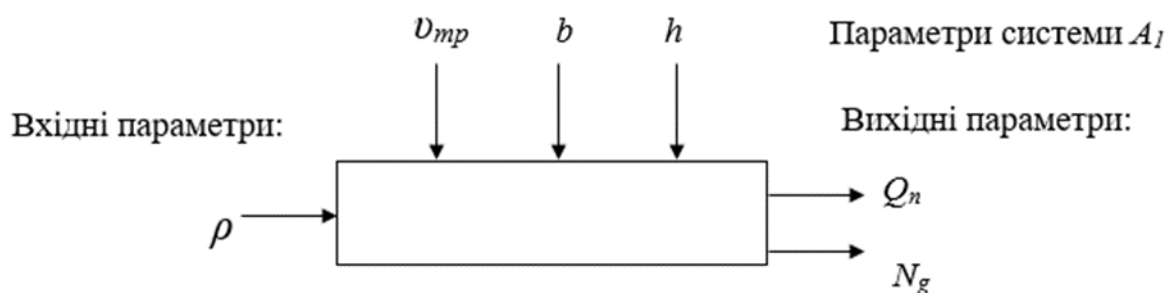


Рис. 1.8. Параметрична схема процесу завантаження та дозування технологічного потоку

$$Q_n = 60 \cdot V \cdot b \cdot h \cdot \rho \cdot K_q, \quad (1.3)$$

де  $V_{mp}$  – швидкість транспортера, м/хв;

$b, h$  – ширина транспортера та висота потоку маси, м;

$\rho$  – густина маси, т/м<sup>3</sup>;

$K_q$  – коефіцієнт, нерівномірність потоку.

Для визначення коефіцієнта  $K_q = 0,85 - 0,95$  середньостатистична похибка прогнозування при реалізації алгоритму (рис. 1.9) становить 3 %.

Для безперебійної роботи лінії в живильнику зеленої маси має бути запас сировини  $G_M$ , яка при дозуванні скидається вирівнюючим барабаном бітера. Якщо в живильнику накопичений страховий запас зеленої маси  $G_M$ , то функціонування процесу дозування буде спостерігатися у тому випадку, коли витрата маси ( $G_p$ ) на технологічний потік через дозатор буде дещо меншою від її надходження ( $G_q$ ) з транспортного засобу в накопичувач-живильник (тобто  $G_q > G_p$ ), тоді рівняння, що характеризує інтенсивність зміни запасу, набуде такого вигляду:

$$\frac{dG_M}{dt} = G_q - G_p. \quad (1.4)$$

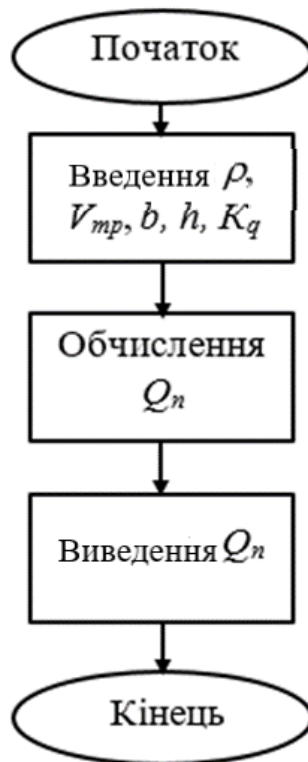


Рис. 1.9. Блок-схема алгоритму дозування зеленої маси

Залежність між страховим запасом маси та інтенсивністю витрати можна визначити за виразом:

$$G_M = \int [(G_q - G_p)] dt . \quad (1.5)$$

Тут інтегрування характеризує динаміку накопичення маси, а якщо за постійного  $G_p$  виникають перебої в доставці маси транспортними засобами то, щоб запобігти зупинці процесу вирішують питання зменшення  $G_p$ , тобто зменшують  $V_{тр}$  або  $h$ .

#### 1.1.2.2. Подрібнення сировини та будова блок-схеми алгоритму

У технологічній лінії заготівлі зелених кормів з механічним зневодненням і отриманням протеїнових концентратів велике значення має подрібнення зеленої маси. Перед механічним зневодненням необхідно забезпечити максима-

льне руйнування клітинної структури без переподрібнення волокнистих компонентів, оскільки від цього залежить ступінь вилучення соку і якість вичавків.

Виходячи з аналізу наукових робіт (Кощаев, 2000; Кулаков и др., 1999; Новиков и др., 1987), ступенем подрібнення зазвичай називають співвідношення лінійних розмірів не подрібненого і подрібненого матеріалу. Подрібнення в різних робочих органах здійснюється в результаті однієї дії або поєднання декількох дій: різання, розриву, розбивання, стиску, розколювання, розщеплення, стирання. Схема функціонування подрібнювача до прийнятого підходу представлена на рис. 1.10.

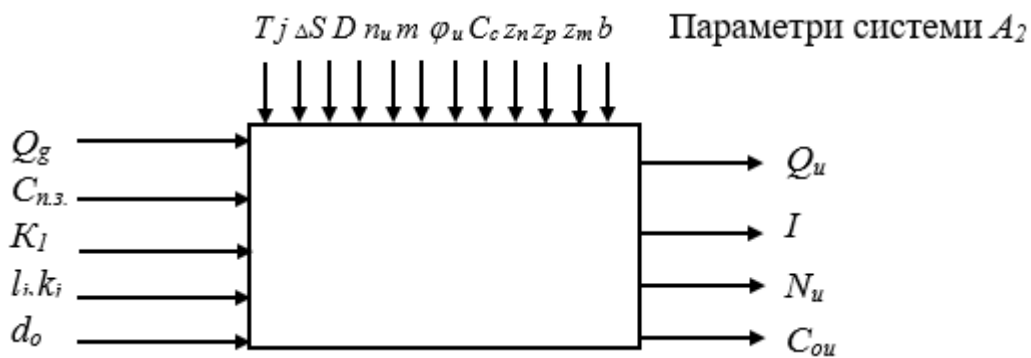


Рис. 1.10. Параметрична схема процесу подрібнення

Вхідні параметри (вектора  $\bar{x}$ ):  $Q_g$  – кількість віддозованого матеріалу, середня довжина його  $i$ -ої фракції  $l_i$ , відсутковий вміст  $i$ -ої частини  $k_i$ , вміст поживних речовин у масі  $C_{n.z.}$ ; фізико-механічні властивості матеріалу перероблюються – коефіцієнтом жорсткості  $k_l$  – (жорсткість), середньостатичний  $d_0$  діаметр стебел.

Модель для ступеня подрібнення  $J$  описують функціональним рівнянням

$$J = f(Q_g, C_{i.c.}, l_i, k_i, d_0, D, T, n_u, m, \varphi_u, G_c, z_i, z_m, b). \quad (1.6)$$

Параметри стану враховують кількість ножів у апараті  $z_n$ ; швидкість обертання вала  $n_u$ , кут нахилу ножа до площини різання, кількість протирізальних елементів  $z_p$ , діаметр ротора подрібнювального апарата  $D$ , ширина ротора  $b$ , кі-

лькість маси  $G_c$  подрібненої ножами за один оберт ротора, переміщення матеріалу за один робочий хід ножа  $T$ ; кількість молотків у роторі дробарки  $z_m$ ; кількість зазорів між молотками  $m$ ; об'ємна маса матеріалу  $j$ .

Вихідні параметри (вектор  $J$ ): кількість подрібненого матеріалу  $Q_u$ ; ступінь його подрібнення  $J$ , вміст поживних речовин після подрібнення  $C_{nu}$ ; енерговитрати на процес  $N_u$ .

Теоретичні уявлення про процеси подрібнення встановлюють якісні залежності витрати енергії і виходу окремих фракцій подрібненого матеріалу від ступеня подрібнення. Кількісні характеристики визначають на основі аналізу матеріальних енергетичних потоків.

Математичні описання процесу подрібнення будують на експериментальних даних.

Завдання теоретичного визначення ступеня подрібнення апаратом може бути зведене до обчислення середньої довжини готового корму і ступеня його розщеплення.

$$J = J_1 \cdot J_2, \quad (1.7)$$

де  $J_1$  – ступінь подрібнення від різання;

$J_2$  – ступінь подрібнення від розщеплення.

Розглядаючи найбільш поширені апарати дискового і барабанного типів, робочими органами в яких є ножі і молотки, довжину подрібненої маси, виділену після апарата, визначають отриманою залежністю

$$l = \frac{L_a \cdot \cos \varphi_u + \frac{V_{i\ddot{a}}}{n_\ddot{e} \cdot z_f}}{L \sin \varphi_\ddot{e} + a_1 \cos \varphi_\ddot{e} \frac{V_{i\ddot{a}}}{n_\ddot{e} z_f}}, \quad (1.8)$$

де  $L$  – середня довжина стеблової початкової маси, м;

$a = \mu \cdot d_o$  – ширина зазору, м;

$\mu$  – коефіцієнт розщеплення, варійований в діапазоні;

$\varphi$  – кут нахилу стебла до площини різання, град;

$V_{nod.}$  – швидкість подачі матеріалу, м/хв.

$$L = \sum_{i=1}^n l_i \frac{k_i}{100}, \quad (1.9)$$

де  $l$  – кількість фракцій.

Для випадку роздроблення стебел формула може набути вигляду:

$$l = \frac{L \frac{V_{\dot{r}\dot{a}.}}{n_{\dot{e}} \cdot z_n}}{L \sin \varphi_u \frac{V_{\dot{r}\dot{a}.}}{n_u \cdot z_f}}. \quad (1.10)$$

Зміна середньої довжини різання і залежності від кількості ножів у вторинному кормоприготувальному агрегаті «Волгарь» подають показовою функцією

$$l = L \cdot e^{-\rho z_f}, \quad (1.11)$$

де  $\rho$  – ймовірність багаторазового подрібнення частинки.

При поєднанні дискових і молоткових подрібнювачів або у випадку первинного подрібнення ножовим барабаном кормозбирального комбайна довжину подрібнення визначають за формулою

$$l = \frac{60 \cdot Q_u \cdot L}{D \cdot \pi \cdot b \cdot n_{\dot{e}} \cdot \dot{e}_1 \cdot \dot{e}_2 \cdot \dot{e}_3 \cdot \dot{e}_4 \cdot j} \cdot \dot{a}^{-\left(\tilde{N}_0 + \frac{\tilde{N}_1}{d_0}\right)}, \quad (1.12)$$

де  $\kappa_l$  – коефіцієнти часу перебування товару в камері;

$\kappa_2$  – геометричні параметри молотка;

$\kappa_3$  – умови подачі матеріалу в камеру;

$C_0, C_1$  – постійні коефіцієнти, які використовують з дослідних даних.

Для випадку подрібнення маси ножовим пристроєм максимальною подачею матеріалу, наприклад шнеком, середня довжина подрібнення може бути виражена формулою

$$l = \frac{60 \cdot G_c \cdot z_H \cdot T \cdot z_H \cdot 0,15 \cdot \hat{e}_1}{Q_u}. \quad (1.13)$$

За формулами можна визначити середній ступінь подрібнення (по довжині) стебел. За цих самих залежностей вирішують і зворотну задачу – по заданій середній довжині подрібнення маси розраховують необхідні відокремлені параметри подрібнювального апарата, наприклад число ножів у різальному апараті або кількість обертів його вала.

Для отримання середньої довжини подрібнення може бути використана також емпірична залежність

$$l = 7,44 \cdot e^{0,016L}. \quad (1.14)$$

Ступінь подрібнення від різання  $J_1$  дорівнюватиме

$$J_1 = \frac{L}{l} \quad (1.15)$$

Для випадку молоткової дробарки площа, яка припадає на один контакт молотка, може бути визначена за рівнянням:

$$S_{\hat{e}} = \frac{S_p}{z_m} - (m \cdot S_{\hat{c}}), \quad (1.16)$$

де  $S_p$  – площа розгортки ротора;

$S_{\hat{z}}$  – площа зазору між молотками на розгортці.

Тоді ступінь подрібнення від розщеплення матиме вигляд:

$$J_2 = \hat{e}_5 \cdot \hat{e}_1 \frac{1}{S_{\hat{e}}}, \quad (1.17)$$

де  $k_5$  – масштабний коефіцієнт.

Зі ступенем подрібнення і продуктивністю агрегату пов'язана і енергоємність процесу. Загальна потужність в подрібнюючому апараті з ножовими робочими органами визначається формулою (1.18),

$$J_2 = \hat{e}_5 \cdot \hat{e}_1 \frac{1}{S_{\hat{e}}}, \quad (1.18)$$

або в розкритому вигляді, як сума складових

$$N = \frac{q \Delta S \cdot z_H \cdot z' \cdot R_{cp} \cdot \cos \alpha \cdot \pi \cdot n_u}{102 \cdot 30} + \frac{Q_u V_1^2 \cdot 0,736}{2,75 q_1} + \frac{p_1 \eta_n \cdot \pi \cdot n_u \cdot d_{\ddot{o}}}{60 \cdot 102} + \frac{F_H \cdot \gamma_b \cdot z_H \cdot \varepsilon^2 \cdot r_{\ddot{o}.i.} \cdot \omega^3}{2 V_{i.\ddot{o}.} \cdot q_1 \cdot 102}, \quad (1.19)$$

де  $\Delta S$  – довжина леза ножа, що бере участь в різанні, м;

$R_{cp}$  – відстань від осі вала до середньої лінії, що ріжеться шару корми, м;

$V_I$  – швидкість частинок, що сходять з ножа у вивантажувальне вікно,

м/с;



$r_{ц.н.}$  – радіус центральної частини ножа, м;

$V_{н.ц.}$  – лінійна швидкість ножа в центральній його частині, м/с;

$N_{пер.}$ ,  $N_{рез.}$ ,  $N_{подш.}$ ,  $N_b$  – відповідно, потужності, що витрачаються на процес різання, переміщення матеріалу до вивантажувального вікна, подолання тертя, подолання опору повітря, кВт.

Для дробарок потужність можна визначити на підставі базової формули, проте необхідно враховувати особливості процесу:

$$N_2 = \frac{3,6 \cdot \hat{e}_6 \cdot \hat{e}_7 \cdot \delta \cdot D^2 \cdot L \cdot n_H}{60}, \quad (1.20)$$

де  $k_6$ ,  $k_7$  – коефіцієнт, кількості молотків на роторі і схеми їх розміщення, які впливають на енергоємність і якість подрібнення;

$N_u = N_1 + N_2$  – сумарні енерговитрати на різання і дроблення.

Втрати поживних речовин і вітамінів залежать від якості металу, з якого зроблені корпус і робочі органи апарата, які контактують і подрібнюють матеріал, від часу знаходження маси в апараті і температури, що виникає в результаті тертя і дії робочих органів на матеріал.

Для подрібнюючих апаратів і дробарок втрати білка можна прийняти середньостатистичною постійною величиною в межах середньої швидкості обертання ротора:  $n_{ср.} = N_1 \dots n_i$ . При цьому необхідна стабілізація роботи подрібнювача по продуктивності технологічного потоку  $Q_u$  від  $Q_q$   $Q_q = Q_u = const$ . В іншому випадку буде мати місце або недовантаження подрібнюючого апарата, або утворення та накопичення зайвого потоку маси, який необхідно усувати зміною режимів роботи подрібнювача або дозатора.

Суттєве значення має похибка прогнозування ступеня подрібнення за розробленим алгоритмом (рис. 1.11) для подрібнювачів з різальними робочими і молотковими з отриманими значеннями за статистичної обробки експериментальних даних коефіцієнтів :  $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = \kappa_4 = 0,8$  і  $\kappa_5 = 0,5 \cdot 10^{-4}$  становить 4,5 %.

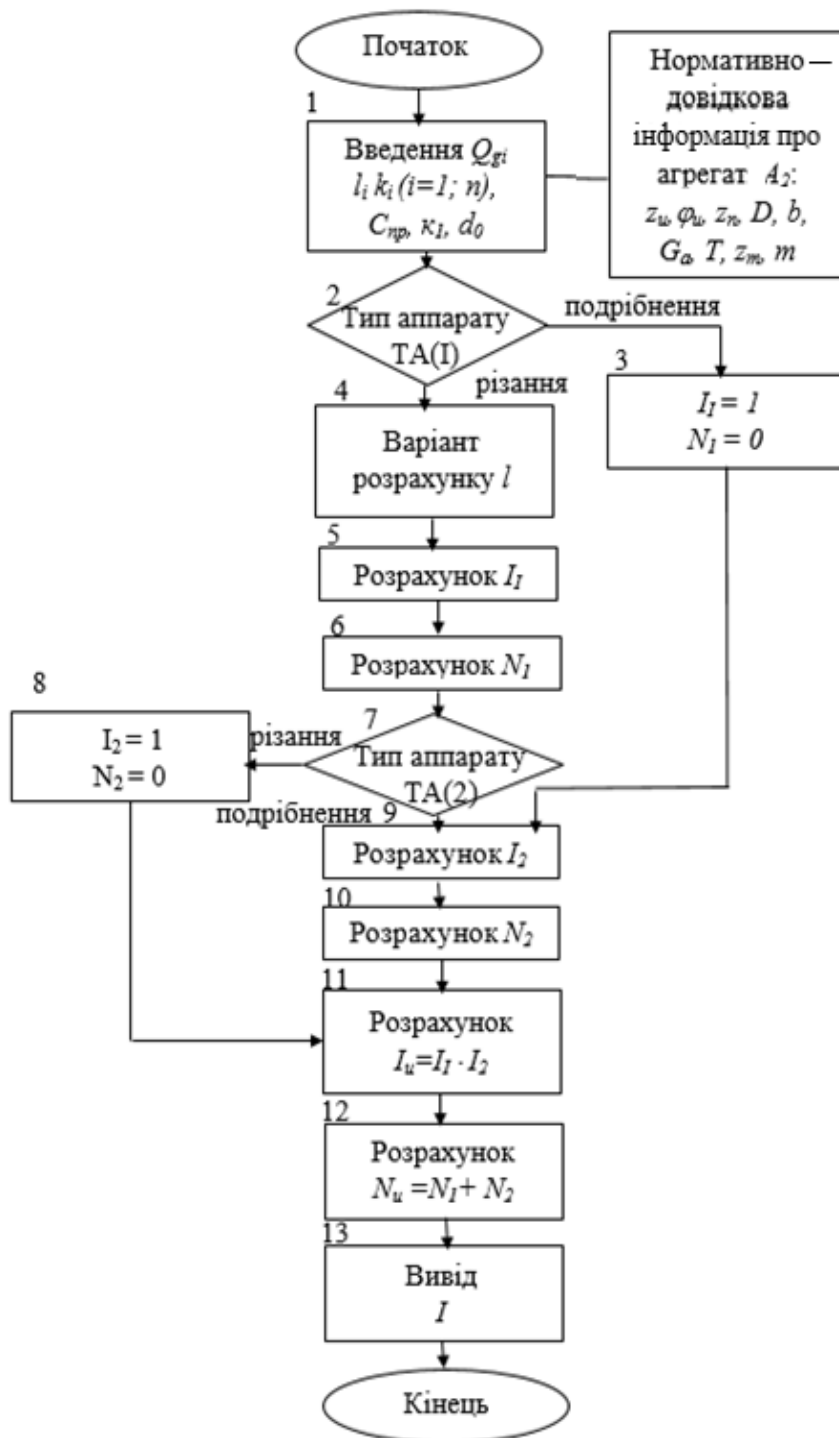


Рис. 1.11. Блок-схема алгоритму процесу подрібнення маси

### 1.1.2.3. Вологе фракціонування сировини

Процес зневоднення зелених рослин від початкової вихідної вологості до необхідної кінцевої, що задовольняє умовам зберігання без будь-яких консервантів, здійснити одним прийомом вологого фракціонування, навіть і багаторазового, практично неможливо, внаслідок зростання енерговитрат на процес що-

до забезпечення вологості зневоднення маси 58–60 %. З огляду на доступну наукову літературу (Петренко и др., 2011; Дилинский, Малецкая, 1968; Новиков и др., 1986; Новиков, Чурсинов, 1980), механічне зневоднення доцільно використовувати на високовологих зелених кормах. Такий висновок зв'язався не випадково, оскільки зневоднення кормів з низьким умістом вологи пов'язане зі зростанням зусиль стиснення матеріалу можливим виходом з ладу обладнання та малою кількістю виходу вологи. Тому необхідна комплексна стратегія застосування вологого фракціонування та інших способів переробки зеленої маси, тобто визначення такої межі її вологості і стану, коли доцільно прийняти рішення, припустимо, про пряме сушіння маси без механічного віджимання. Цей підхід дозволяє застосовувати в разі зневоднення не тільки культурні одно- і багаторічні трави, але й виробляти сік, пасту, переробляти в біологічно активні добавки і трав'яні гранули в сумішах такі нетрадиційні джерела кормової сировини, як бадилля буряку, листя кормової і харчової капусти, бадилля томатів, пасльону, ягоди якого переробляють для лікарських цілей (Кулаков и др., 1999; Смурігіна, 1985; Фарман, 1978; Tchernov, 1996), буркун, молодий очерет, кропиву, багато інших лугових культур України.

Для отримання сухих кормів зі зеленої маси, їх збереження за вологості 12–14 %, після механічного зневоднення подальше зниження вологості здійснюють сушінням (Кобозев, 1984; Сенік и др., 1984).

Головним завданням фракціонування є поділ зеленої маси на жом і сік, при цьому вихідні параметри процесу мають забезпечувати необхідні якісні характеристики для подальших процесів. Сік після віджимання повинен мати достатній вміст сухої речовини, білка, каротину, вітамінів. Вологість жому, який виходить, забезпечує можливість його подальшої переробки в сухі корми з мінімальними втратами білка, каротину і обмеженими енерговитратами. Розв'язання такого завдання можливе лише в разі комплексного підходу до всього технологічного ланцюжка, починаючи з вологого фракціонування до отримання з жому сухих кормів. У зв'язку з цим пропонується гіпотеза поетапного зниження вологості зеленої маси: зневоднення; досушування жому до пе-

вної вологості, але такої, коли зберігання без консервантів неприпустимо, а подальше зниження вологості здійснити шляхом змішування з більш сухими компонентами (подрібнена солома, комбікорм); брикетування отриманої суміші (рис. 1.12).

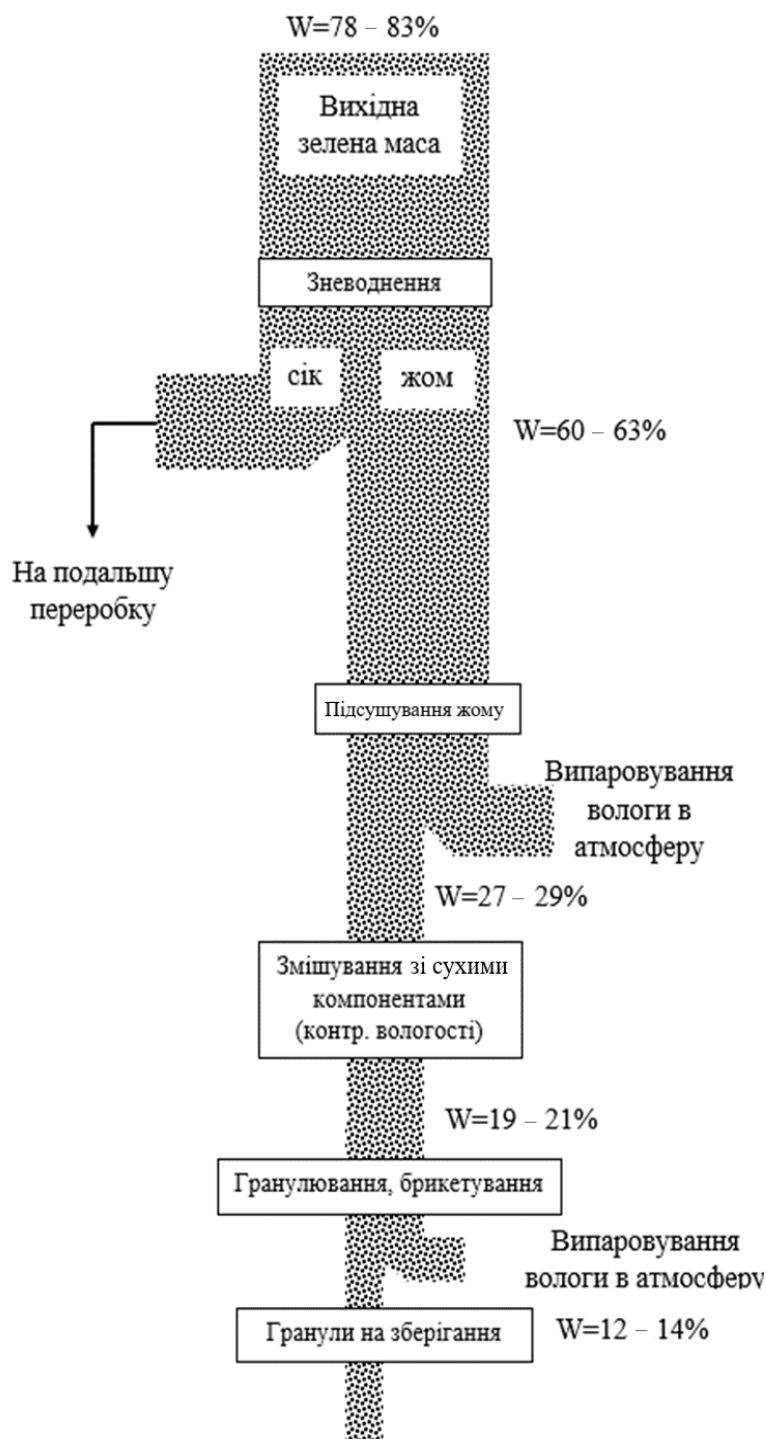


Рис. 1.12. Комбінована схема зміни балансу вологи у вхідній масі при виробництві кормів зі застосуванням механічного зволоження

Таким чином, розкладаючи вихідну вологість зеленої маси по процесах технології, можна домогтися виключення додаткового випаровування вологи, яку вносять при брикетуванні, і гранулювання різання в традиційних процесах; зниження енерговитрат; поліпшення якості вироблених кормів. Завдання розподілу вологості жому по технологічному ланцюжку може бути представлене підсистемою в агрегативній системі БАД. Реалізація наміченого заходу має забезпечити нормальний технологічний режим та мінімальні втрати білка і каротину  $\rightarrow \min$  з прагненням до мінімуму суми енерговитрат, що беруть участь у процесах: фракціонування, досушіння, змішування, гранулювання, брикетування,

$$(E_{\delta} + E_{\bar{a}} + E_{\bar{m}} + E_{\bar{ad}}) \rightarrow \min .$$

Причиною невдалого рішення може бути низька якість подрібнення, тобто в цьому випадку до комплексу завдань, у загальну комбіновану модель процесу зниження вологості маси від початкової до кінцевої, підключається подрібнення з метою можливої зміни завдання на ступінь подрібнення.

Розглядаючи процес вологого фракціонування рослинної маси (рис. 1.13), визначимо вектори  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  та  $\bar{z}$ .

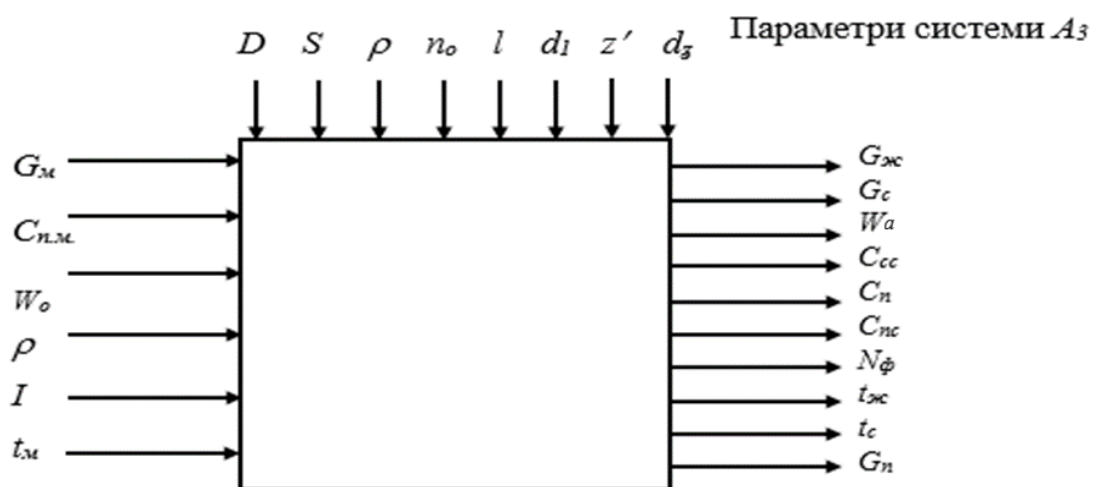


Рис. 1.13. Параметрична схема процесу вологого фракціонування рослинної маси

Вхідні параметри (вектор  $\bar{x}$ ): температура маси на вході  $t_m$ , продуктивність потоку  $G_m$ , вміст поживних речовин у кормі  $C_{nm}$  (для можливості обліку втрат, наприклад білка + каротину); вологість маси  $w_0$ , питома вага переміщуваного матеріалу  $\beta$ , ступінь подрібнення  $J$ .

Параметри стану (вектор  $\bar{z}$ ); зовнішній і внутрішній діаметри шнека та його крок –  $D$ ,  $d$  і  $S$ ; відповідно швидкість обертання вала  $n_0$ , створюваний тиск віджиму  $p$ , довжина шнека  $l$  та діаметр отвору зеєрного циліндра  $d_3$ .

Вихідні параметри  $G_{жс}$ ,  $G_c$ ,  $G_n$  – це маса виходить з преса жому, соку і механічних втрат корму, відповідно:  $w_{жс}$  – вологість жому;  $C_{cc}$  – уміст сухої речовини в соку;  $t_{жс}$  – температура жому на виході з преса;  $t_0$  – температура соку на виході;  $C_{nc}$  – уміст поживних речовин у зеленому соку;  $C_{нжс}$  – уміст поживних речовин у жомі.

Умови функціонування процесу віджимання маси в якісному плані є такі:

$$C_{ni} = C_{nc} + C_{нжс} + P_{\phi}(\tau, t, A_{\phi}). \quad (1.21)$$

Вміст поживних речовин у подрібненій масі, що надходить на віджимання, має дорівнювати сумі поживних речовин у соку, жомі та втрат, які є функцією і зміни температури, тривалості процесу та процесів окиснення (протеолізу)  $A_{\phi}$  в результаті прямого контакту з металевими поверхнями преса, киснем повітря, природним окисненням, біологічним розпадом.

Прогнозування впливу виникнення температури в зеленій масі, жомі та соку в процесі зневоднення, можуть враховуватися теоретичною залежністю

$$C_n(\tau) = C_{ni}^{exp-\lambda(T)\tau}, \quad (1.22)$$

де  $C_{ni}$ ,  $C_n(\tau)$  – вміст поживних речовин у вихідній масі і в поточний момент часу  $\tau$ ;

$\lambda(m)$  – константа, що характеризує втрати поживних речовин при змінній температурі.

Узагальнений показник якості змін, які відбуваються в продуктах зневоднення (соку і жомі) в процесі їх отримання, наведено в підрозділі 1.5.

Рівняння матеріального балансу для подрібненої маси  $G_u$  можна представити в такому вигляді:

$$G_u = G_a + G_n + G_n. \quad (1.23)$$

Звідси вміст вологи у вихідній масі, жомі та соку пов'язаний балансовим співвідношенням

$$G_u \cdot W_0 = G_c (1 - C_{cc}) + (G_u - C_c) W_a. \quad (1.24)$$

Тут вологість подрібненої маси, жому та вміст сухої речовини в соці виражається в частках.

Із рівняння (1.24) випливає, що

$$C_c = (1 - W_a) - (W_0 - W_a) \frac{G_u}{G_c}. \quad (1.25)$$

Маса соку  $G_c$  може бути визначена за рівнянням

$$G_c = \frac{\pi d_3^2}{4\mu} \cdot h \cdot z' \cdot S' \cdot \rho \cdot \tau \cdot f(J), \quad (1.26)$$

де  $\mu$  – в'язкість соку, Па;

$z'$  – число отворів у зерному циліндрі;

$\tau$  – час процесу віджимання;

$h = D_0 - d_1$  – товщина шару маси, яка зневоднюється.

$f(J)$  можна представити статистичною залежністю

$$f(J) = C_0 + C_1 J, \quad (1.27)$$

де  $C_0, C_1$  визначають при обробці експериментальних даних.

Масу, що проходить через прес  $G_u$ , можна виразити через параметри шнека

$$G_u = \frac{\pi h^2 S \cdot n \cdot \rho \cdot (1 - \varphi)}{4} \tau, \quad (1.28)$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт заповнення зєрного циліндра.

Для обчислення тривалості зневоднення використовують залежність

$$\tau = -\frac{4h^2}{c\pi^2} \ln\left(\frac{W_\alpha - W_\varepsilon}{W_0 - W_k}\right), \quad (1.29)$$

де  $W_k$  – компресійна вологість жому до моменту стабілізації виходу соку, тобто вологість спресованої фракції жому за сталого тиску.

У нашому випадку  $W_k$  визначаємо з використанням експериментальних даних

$$W_k = a_0 \cdot \rho^{-a_1}, \quad (1.30)$$

де  $\rho$  – проти тиск на конусі, відомий по манометру;

$a_0$  та  $a_1$  – коефіцієнти для умов фракціонування зеленої маси.

$$W_k = 44,2 \rho^{-0,07}, \quad (1.31)$$

Коефіцієнти  $a_0$  та  $a_1$  отримані за результатами обробки експериментальних даних для умов зневоднення люцерни.



Умова фракціонування в загальному вигляді може бути виражена так:

$$W_{\alpha} = f(W, W, P, h, C(J)\tau). \quad (1.32)$$

Коефіцієнт  $C$ , що залежить від ступеня пористості та ущільнення матеріалу, можна прийняти як функцію ступеня подрібнення

$$\tilde{N} = b_0 - b_1 J, \quad (1.33)$$

де  $b_0$  та  $b_1$  – коефіцієнти, які визначають при обробці експериментальних даних.

У загальному вигляді рівняння вимірювання вологості жому в часі буде мати вигляд:

$$\frac{dW_{\alpha}}{d\tau} = f(\tau, W_{\alpha}, P, h, (d, D), C(J), W_0). \quad (1.34)$$

За формулою (1.35) знаходимо вологість жому на виході з преса

$$W_{\alpha} = W_{\alpha} + (W_0 - W_{\alpha}) \cdot l^{-\frac{\tau \cdot c \pi^2}{4h^2}} \quad (1.35)$$

або для оцінки впливу компресійної і початкової вологості можна записати, що

$$W_{\alpha} = W_{\alpha} \left( 1 - l^{-\frac{\tau \cdot c \pi^2}{4h^2}} \right) + W_0 \cdot l^{-\frac{\tau \cdot c \pi^2}{4h^2}}, \quad (1.36)$$

де  $W_0$  – початкова вологість надходить на переробку матеріалу;

$$\tau - \text{є функція швидкості обертання } n_0; \quad \tau = \frac{60 \cdot L}{n_0 S}.$$

За спільного розв'язання рівнянь (1.23) та (1.35) можна визначити вираз

для обчислення  $C_{cc}$  і в будь-який момент часу дізнатися про величину вологості жому, який виходить, це підтримує технологічний режим, спрямований на задану вологість жому або вмісту сухої речовини в соку. Крім того, як регулюючий параметр може бути обраний не просто вихід соку  $G_c$ , а і вміст сухої речовини в соку  $C_{cc}$ , завдяки цьому можна контролювати процес коагуляції (згортання) білка в зеленій масі і в жомі залежно від температури маси. Виходячи з теорії шнеків, продуктивність преса можна виразити як:

$$Q = 47,1 \left[ (D + 2\lambda)^2 - d^2 \right] S \varphi n_0 \rho, \quad (3.37)$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт заповнення;

$\lambda$  – радіальний зазор між зовнішньою кромкою гвинта і внутрішньою поверхнею зеєрного циліндра.

У досліджуваному шнековому пресі, крім транспортуючого шнека, є і підпресуючий, а в камері підпресування перед рухомим конусом шнек відсутній. Маса переміщується за рахунок продавлювання спресованого шару; також здійснюється проковзування і повернення маси за рахунок тертя і протитиску, тому необхідно враховувати коефіцієнт відставання. У цьому випадку формула продуктивності матиме вигляд:

$$Q = 47,1 D (D + 2\lambda)^2 - d^2 (S - d_1) \varphi \dot{I}_0 \rho \gamma, \quad (1.37)$$

де  $d_1$  – товщина витка шнека;

$\gamma$  – коефіцієнт відставання, який враховує зниження реальної продуктивності від можливої розрахункової залежно від властивостей пресованого матеріалу, створюваного протитиском, від значення коефіцієнтів внутрішнього і зовнішнього тертя маси, від величини зазору між витком шнека і зеєрним циліндром.

Прокковзування полягає в обертанні шару маси разом зі шнековим витком, у результаті чого швидкість лінійного переміщення матеріалу до вивантажува-

льного вікна знижується. Разом із тим після провертання матеріалу відбувається робота з подолання сили тертя і лінійного переміщення матеріалу. Ця робота тим більша, чим більша величина прикладеного протитиску конуса.

З одного боку, більший протитиск забезпечує більший уміст сухої речовини в соку  $C_{cc}$  і меншу вологість жому  $w_{жк}$ . З іншого боку, це призводить до підвищення температури маси від зовнішнього і внутрішнього тертя, від прикладеного тиску і до збільшення потрібної потужності на прес. Нагрівання ж матеріалу викликає згортання білків у структурі рослини і різко знижує вихід сухої речовини із соку; до того ж температурні впливи позначаються і на якості продуктів фракціонування.

Силу тертя матеріалу по поверхні зерного циліндра і поверхні шнека при провертанні маси виражають рівнянням

$$dF = 2\pi RP\varepsilon(f_3 + f_4)\cos\beta dz \quad (1.38)$$

де  $f_3$  – коефіцієнт тертя матеріалу по поверхні зерного циліндра;

$\varepsilon$  – коефіцієнт бокового тиску;

$f_{ш}$  – коефіцієнт тертя по поверхні і лопаті шнека.

Нормальна сила реакції зневодненої маси на лопать шнека матиме вигляд:

$$dF_i = P \cdot S_{\varepsilon} \quad (1.39)$$

де  $S_n$  – величина площі поверхні витка шнека, що знаходиться в контакті з масою.

Робота, яка витрачається на переміщення матеріалу, дорівнює:

$$A = F_{\partial\partial} \cdot S_n = (f_3 + f_{\phi}) \cdot F_i \cdot S_n \quad (1.40)$$

де  $S_n$  – переміщення матеріалу;

$F_n$  – сила нормального тиску.

Далі визначають роботу, витрачену на подолання тертя, температуру нагрівання жому і соку в результаті прикладеного тиску при зневодненні

$$A_{\delta\delta} = N_{\delta\delta} \cdot t, \quad (1.41)$$

де  $N_{mp}$  – потужність, що витрачається на подолання тертя маси об стінки зерного циліндра при її переміщенні до вивантажувального вікна;

$t$  – час переміщення маси.

Різниця температур, до якої нагрілася маса в разі зневоднення, і між початковою її величиною  $t_k - t_n = \Delta t$ , може бути визначена відношенням теплоти  $m_0$ , отриманої в результаті механічної роботи, до маси, яка перебуває в шнеку  $m_0$ , і його теплоємності  $C_0$

$$\Delta t = \frac{Q_T}{C_0 m_0} = \frac{A - A_{\delta\delta}}{C_0 m_0} = \frac{A_{\delta\delta}}{C_0 m_0} \cdot e^{\frac{t}{T}}, \quad (1.42)$$

де  $T$  – постійна, яка пов'язана з коефіцієнтом тепловіддачі, що враховує розсіювання тепла в навколишнє середовище, жом і сік.

Потужність процесу зневоднення залежить від великої кількості факторів: фізико-механічних властивостей маси, яку віджимають і стадії її вегетації; від величин внутрішнього і зовнішнього тертя; від зусилля стиснення маси в пресі та інших факторів, зазначених параметричною схемою. Мають також значення і конструктивні особливості робочих органів і якість їх виготовлення, особливо у відношенні жорсткості контакту з поверхнею маси.

Загальна потужність приводу шнекового преса може бути представлена в певному вигляді:

$$N_0 = \frac{N_{mp} + N_1 + N_2 + N_3}{\eta}, \quad (1.43)$$

де  $N_1$  – потужність, необхідна для забезпечення переміщення маси до вивантажувального вікна через коркову зону циліндра і міжконусний перетин;

$N_2$  – потужність, необхідна для транспортування маси від приймального бункера до виходу з конуса шнека;

$N_3$  – потужність, необхідна для ущільнення маси;

$N_{mp}$  – потужність, необхідна для подолання тертя матеріалу в пресі.

$$N_{mp} = \frac{M_{\text{т.т.}} \cdot n_0}{97500} = \frac{2\pi P_n f (R^3 - r^3)}{3 \cdot 97500}, \quad (1.44)$$

де  $M_{mp}$  – момент сили тертя, кг·см;

$P_n$  – середній питомий тиск пресування.

Потужність, яка необхідна для проштовхування маси через зону підпресування і щілинний зазор між зєрним циліндром та конусом, визначаються:

$$N_1 = \frac{P \cdot F \cdot L_1 \dot{V}_0}{60 \cdot 102} = \frac{P \cdot \pi (R^2 - r^2) L_1 \cdot n_0}{60 \cdot 102}, \quad (1.46)$$

де  $F = \pi (R^2 - r^2)$  – площа кільцевого перерізу маси проштовхується гвинтовим транспортером;

$L_1$  – шлях, який проходить маса за час одного оберту гвинта.

Важливим моментом у процесі фракціонування є, крім визначення раціональних режимів роботи – зниження енерговитрат, які забезпечують задану  $W_{ж}$ .

Функціонування технологічного процесу представлено на блок-схемі алгоритму (рис. 1.14)  $\rho$ ,  $W$ ,  $K_o$ ,  $I$ ,  $G_m$ ,  $\mu$ .

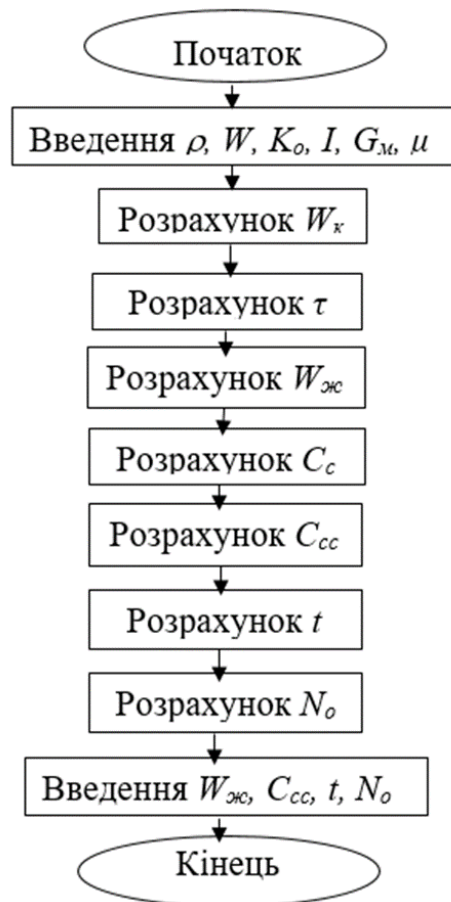


Рис. 1.14. Блок-схема алгоритму процесу вологого фракціонування зеленої маси

Виконання оптимального завдання функціонування може бути досягнуто тільки в комплексному розгляді усієї підсистеми, що включає подрібнення, зневоднення, досушку жому, змішування і брикетування сумішей. Основним елементом у даній підсистемі має бути процес, що забезпечує задану вологість жому і оптимальний вихід сухої речовини зі соком. Комплексна реалізація цих питань дозволяє визначати оптимальну вологість виходу кормового матеріалу, що забезпечує мінімум енерговитрат. Статистична обробка експериментальних даних допомагає отримати величини коефіцієнтів, які входять у модель:  $C_0 = 60$ ;  $C_1 = 10$ ;  $b_0 = 1$ ;  $b_1 = 49,8$ .

#### 1.1.2.4. Сушіння віджимок у рухомому шарі

Поряд з видаленням соку із початкової маси в процесі механічного зневоднення частина вологи залишається в жомі, причому деяка її кількість знаходиться на фракціях жому у вигляді тонкої поверхневої плівки, яку легко

видалити при продувці повітрям невисокої температури. Оскільки після механічного зневоднення жом має добре розкрити структуру, то одним із ефективних методів для його досушування є конвективний метод, заснований на принципі видалення вологи в результаті зміни її агрегатного стану, за безперервного впливу теплоносія на матеріал, який переміщується та висушується.

Прикладом конструктивного виконання пристрою для реалізації цього способу може слугувати шарова сушарка з перфорованим днищем і нескінченним транспортером для переміщення корму.

Для математичного опису процесу досушування жому в рухомому шарі необхідно обґрунтувати параметри рухомого шару; визначити діапазони критичного вологовмісту з урахуванням виключення перегріву самого матеріалу для збереження його якісних характеристик; встановити вплив керованих параметрів, що характеризують режими процесу на інтенсивність сушіння в динаміці; вивчати закономірність зміни температури матеріалу від технологічних режимів процесу; встановити закономірності функціонування всього процесу.

Якщо відома довжина  $l_c$  робочої зони установки для досушування і швидкість переміщення маси транспортером  $V_M$ , то час сушіння визначиться

як  $\tau = \frac{l_c}{V_M}$ . Витрату корму в одиницю часу можна розраховувати за форму-

лою

$$G_a = b \cdot \delta \cdot V_M \cdot \rho, \quad (1.46)$$

де  $b$  – ширина шару жому, який транспортується, м;

$\delta$  – товщина шару, м;

$\rho$  – щільність жому,  $\text{кг/м}^3$ .

Завдання функціонування процесу полягає у виборі впливів таких параметрів:  $G_{жс}$ ,  $G_2$ ,  $G_\delta$ ,  $\delta$ ,  $V_M$ ,  $S$ ,  $V_T$ ,  $W_{ж.к.}$  за вхідної вологості жому  $W_n$  і не допустити перегріву матеріалу, що призводить до денатурації білків і втрати каротиноїдів.

Тут  $G_2$ ,  $G_b$  – витрати пального і повітря для забезпечення функціонування процесу;  $S$  – площа живого перетину перфорованого днями установки;  $V_T$  – швидкість теплоносія.

За певних конструктивних параметрів, встановивши для отримання заданої вологості жому  $W_{ж.к}$  та виходячи з параметричної схеми процесу (рис. 1.15), варіювання можна здійснювати швидкістю переміщення шару  $V_M$ , температурою теплоносія, його кількістю  $G_{ж.к}$ .

Моделі враховують також фракційний склад жому  $\zeta$  і його теплофізичні властивості  $\lambda_{ж.к}$ . У загальному вигляді математичною моделлю процесу є система

$$\begin{aligned} W_{\alpha.i} &= f_1(W_H, \tau = f(l_c, V_M), t_{\alpha.i}, V_c, \delta); \\ t_{\alpha.\delta} &= f_2(t_0, W_{\alpha.i}, t_{\alpha.i}, \tau, \delta, V_c); \\ \dot{I} &= f_3(\dot{A}, \dot{E}, t_{\alpha.\delta}, \tau, W_{\alpha.\delta}), \end{aligned} \quad (1.47)$$

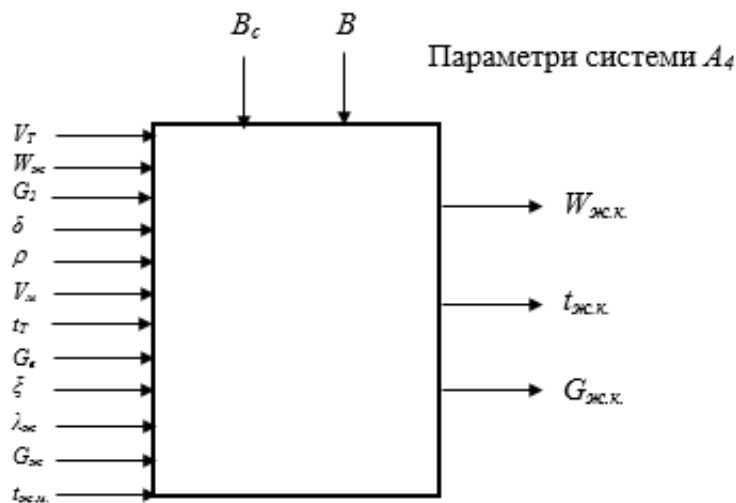


Рис. 1.15. Параметрична схема процесу досушування жому в рухомому шарі

в якій  $W_{ж.к}$  та  $t_{ж.к}$  відображають функціональний зв'язок вологості і температури жому в будь-який момент часу в ході процесу і при його завершенні, а  $\Pi$  – враховують втрати білкової (Б) і вітамінної (К) частин у кормі в результаті змін,



викликаних температурними режимами процесу.

Для процесу досушування жому використовували методи планування експерименту (Адлер и др., 1976; Коццаев, 2000; Новиков и др., 1987; Панфилов, 1986; Новиков и др., 1981), це значно скоротило кількість дослідів, а також можна було кількісно оцінити вплив на кінцеві вологість і температуру процесу кожного з п'яти і кожного з шести змінних параметрів відповідно: температура теплоносія, товщина шару маси, швидкість теплоносія, тривалість сушіння, вологість жому, температура жому початкова.

Загальна кількість розвіданих дослідів має бути  $2^K$ , де  $K$  – кількість факторів. Усі фактори задовольняють усім вимогам, вони незалежні і сумісні. Рівні варіювання обрані з огляду на конкретні умови технологічного процесу, які повинні бути при реалізації досушки жому. Позначення факторів і рівні варіювання для  $W_{ж.к.}$  та  $t_{ж.к.}$ , а також матриця планування експерименту й обробки даних з'явилися як вихідні дані.

Згідно зі складеними ортогональними планами і рандомізацією паралельних дослідів (Адлер и др., 1976; Коццаев, 2000; Панфилов, 1986; Новиков и др., 1981; Холло и др., 1972) виконано обчислювальні процедури і отримано певні результати:

1. Оцінка усередненої дисперсії відтворюваності (помилки досвіду) визначена за формулою

$$S_y^2 = \sum_{i=1}^N S_i^2 / N, \quad (1.48)$$

де  $S_i^2 = \sum_{y=1}^n (y_{ig} - \bar{y}_i)^2 / n(n-1)$  – дисперсія середнього арифметичного в кожному

рядку плану експерименту;

$N$  – кількість експериментів;

$n$  – кількість паралельних дослідів;

$y_{ig}$  – значення відгуку в кожному паралельному досліді;

$\bar{y}_i$  – середнє значення відгуку в паралельних дослідах:

для  $W_{\alpha.\hat{\epsilon}} : S_w^2 = 0,613$ ;  $N = 32$ ;  $n = 3$ ;

для  $t_{\alpha.\hat{\epsilon}} : S_t^2 = 0,669$ ;  $N = 64$ ;  $n = 3$ .

Однорідність дисперсії  $S_i^2$ ; підтверджена за допомогою критерію Кохрена:

$$G_\delta = S_i^2 \max / \sum_{i=1}^N S_i^2 \quad (1.49)$$

де  $S_i^2 \max$  – максимальне значення дисперсій  $S_i^2$ ,  $i = 1, 2; N$ ;  $G_{pw} = 0,074$ ;

$G_T = 0,1899$ ;  $G_{pt} = 0,052$ ;  $G_T = 0,11$ ;  $G_{pw} < G_T$ ,  $G_{pt} < G_T$ .

## 2. Форма функцій відгуку для повного факторного експерименту

$$y_i = b_0 + b_1 x_{i,1} + b_2 x_{i,2} + \dots + b_k x_{i,k} + b_{1,2} x_{i,1} + b_{1,3} x_{i,1} \cdot x_{i,3} + b_{k-1} \cdot x_{i,k} \cdot x_{i,k} \quad (1.50)$$

чи інакше

$$y_i = b_0 + \left( \sum_{j=1}^k b_j \cdot x_{i,j} \right) + \left( \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{z=j+1}^k b_{j,z} \cdot x_{i,j} \cdot x_{i,z} \right) \quad (1.52)$$

У результаті обробки експериментальних даних для обраних з урахуванням перевірки значущості коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента інтервалів варіювання, були отримані функції відгуку (рівняння регресії) для  $W_{ж.к}$  та  $t_{ж.к}$ , які являють собою математичну модель процесу досушування жому:

$$W_{ж.к.} = 21,512 - 9,263t_T + 5,64\delta - 1,523V_c - 6,283\tau + 1,854W_H - 2,081t_T\delta + 0,781t_T \cdot V_c + 1,913\tau - 0,821t_T W_H - 0,377\delta \cdot \tau - 0,238\delta W_H \quad (1.52)$$

$$t_{ж.к.} = 61,416 - 4,21t_H + 7,111t_T + 5,27\delta + 15,88\tau + 0,97V_c - 1,486W_H - 3,464t_T\delta + 5,489t_T\tau + 0,443t_Ht_T - 0,239t_TV_c + 0,201t_TW_H + 1,748\delta\tau - 0,281t_H\delta - 0,301t_H\tau$$

За цими рівняннями можна розрахувати поточні і кінцеві значення вологості жому і його температури в будь-який момент часу (рис. 1.16).

**3.** Перевірка гіпотези про адекватність моделі здійснювалася за критерієм Фішера  $F_p$

$$F_p = S_{ag}^2 / S_{(y)}^2, \quad (1.53)$$

де  $S_{ag}^2$  – дисперсія адекватності

$$S_{ag}^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 / f, \quad (1.54)$$

де,  $f = N - P$ ,  $f$  – число ступенів вільності;

$P$  – числа оцінюваних коефіцієнтів.

Розрахункові значення критерію Фішера для рівняння вологості дорівнюють 1,848, що менше табличного значення на  $F_T = 2,65$  при 5%-вому рівні значущості (Новиков и др., 1981).

Для рівняння температури жому  $t_{ж.к.} F_p = 0,934$ , а  $F_T = 1,635$ , тому адекватність отриманих функцій відгуку дотримується.

За допомогою отриманої системи рівнянь досушки жому в тонкому шарі можна якісно і кількісно оцінити вплив окремих факторів (температури, швидкості теплоносія, товщини шару, початкової вологості жому та ін.), а також отримати розрахункову залежність для тривалості процесу досушування. Коефіцієнти рівняння регресії вказують на ступінь впливу факторів. Аналіз отриманих рівнянь свідчить про те, що кінцева вологість жому в період досушування залежить значною мірою від температури теплоносія, товщини шару жому

та тривалості процесу; меншою мірою – від швидкості теплоносія. Оцінено також і вплив факторів на процес. На зміну кінцевої температури корму в процесі сушіння, виходячи з рівняння, великий вплив мають такі параметри, як тривалість сушіння, температура теплоносія, товщина шару корму і меншою мірою оцінюється вплив сукупності факторів, наприклад, температура теплоносія і вологість жому початкова та ін. Формула справедлива для рівняння за таких значень параметрів:  $t = 50-115$  °C;  $\delta = 10-120$  мм;  $V_c = 1-3$  м/с;  $\tau = 5-25$  хв;  $W_{ж.к} = 60-75$  %; для рівняння;  $t_{ж.к.} = 50-115$  C;  $\delta = 10-120$  мм;  $V_c = 1-3$  м / с;  $\tau = 5-25$  хв;  $t_n = 20-45$  °C;  $W_n = 60-75$  %.

Розрахунок моделі і варіювання параметрів для визначення раціональних режимів досушки жому при мінімумі енерговитрат і збереженні якісних показників корму здійснюється на блок-схемі алгоритму (рис. 1.16).



Рис. 1.16. Блок-схема алгоритму процесу досушування жому в шарі.

### 1.1.2.5 Змішування віджимок з кормовими компонентами

Процес змішування кормових компонентів з метою подальшого брикетування-гранулювання суміші полягає у визначенні оптимальної кількості компо-

нентів, які змішуються з жомом для отримання певної кількості суміші  $G_{см}$  з вологістю, що не перевищує задану  $W_{см}$ . У даному технологічному процесі обирають кілька кормових компонентів, кожен з яких має свою вологість. Крім того, для вирішення поставленого завдання – підготовки суміші заданої вологості і кількості – необхідно визначити і пропорційні вагові співвідношення компонентів, оскільки від цього значною мірою залежить технологічність подальшого процесу – брикетування, яке відбувається тільки в діапазоні певних співвідношень.

Розглядаючи параметричну схему процесу (рис. 1.17), встановлюємо вхідні параметри, де  $G_{жс}$ ,  $G_c$ ,  $G_k$  – вагові співвідношення взятих нами компонентів жому, подрібненої соломи і комбікормів відповідно;  $W_{жс}$ ,  $W_c$ ,  $W_k$  – вологість зазначених кормових компонентів;  $\psi_c$  – фізико-механічні та теплофізичні властивості компонентів.

Параметри стану визначаються конструкцією змішувача, його геометричними параметрами: діаметром ротора, швидкістю обертання лопатевого вала, довжиною апарата  $L$ , кутом атаки робочих лопатей змішувача або гвинтового транспортера  $\varepsilon$  та їх кількістю  $z_c$ . Вихідними параметрами процесу є вологість  $W_{см}$  і кількість одержуваної суміші  $G_{см}$ , тривалість процесу змішування  $\tau$  і усереднені фізико-механічні та теплофізичні властивості суміші –  $\psi_{см}$ . Завдання отримання суміші заданої вологості з пропорційним співвідношенням кормових компонентів з урахуванням обмеження діапазону для кожного компонента в суміші можна звести до задачі лінійного програмування. Задача може бути сформульована як задача мінімізації

$$G_c = f(G_{k1}, G_{ki}, \dots, G_{km}), \quad (1.55)$$

де  $G_{ki}$  – підкоряються системі  $m + 1$  нерівностей (класична  $m$  нерівність)

$$\sum_{i=1}^m W_{ki} \dots G_{ki} \leq W_{cm} \cdot G_{cm} \quad (1.56)$$

$$\frac{G_{ki}}{G_{cm}} \leq \beta_i; \quad i = 1, 2 \dots m \quad (1.57)$$

де  $W_k$ ,  $G_k$  – поточні параметри вологості та вагових співвідношень компонентів.

Тут умова (1.56) визначає вимоги по вологості  $W_k$ , необхідної для брикетування, а умова (1.57) має забезпечити необхідні для брикетування фізико-механічні та теплофізичні властивості. Дотримання цих умов дозволить сформувати брикети або гранули необхідної щільності, в яких створюються умови для внутрішнього теплового масообміну. На першому етапі  $W_k$  є заданою величиною.

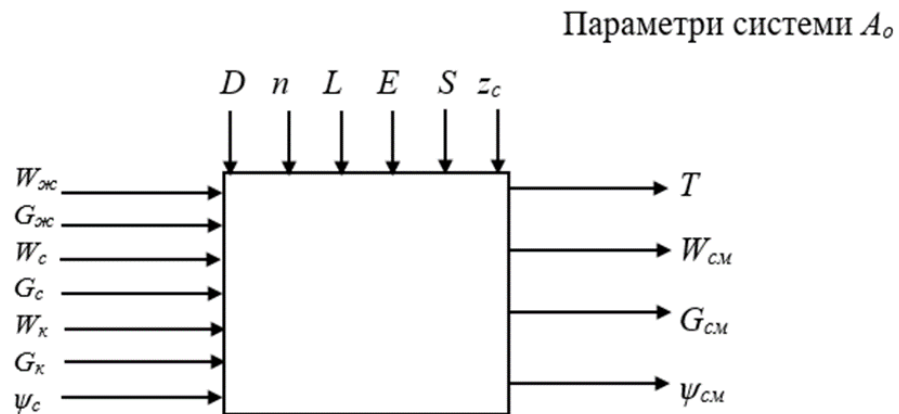


Рис. 1.17. Параметрична схема процесу змішування кормових компонентів

При реалізації всієї підсистеми отримання жому та подальшої його переробки вологість  $W_k$  може розподілятися оптимально між агрегатами. Це означає, що в загальній агрегативній системі БАД за необхідності отримання запланованої вологості жому для змішування з урахуванням мінімізації енерговитрат більшу частину вологи з подрібненої маси можна видалити механічним зневодненням, а досушенням вже довести до необхідного стану. Таким чином, є варіювання ситуаціями всередині підсистеми. У повідомленнях деяких науковців підкреслюються, що на технологічний потік процесу впливають вологість і те-

мпература навколишнього середовища.

Найбільш стійкою і однорідною може бути суміш об'ємом, який менший суми об'ємів усіх компонентів

$$V_{cm} \leq V_{ж} + V_c + V_k$$

Загальний об'єм суміші, якщо він дорівнює сумі об'ємів змішуваних компонентів, може бути описаний виразом:

$$V_{\bar{n}} = \frac{(n_{\alpha} + n_{\bar{n}} + n_k) \rho_{\alpha} \cdot \rho_{\bar{n}} \cdot \rho_k}{n_{\alpha} \rho_{\bar{n}} \rho_k + n_{\bar{n}} \rho_{\alpha} \rho_k + n_k \rho_{\alpha} \rho_{\bar{n}}}, \quad (1.58)$$

де  $n_{ж}$ ,  $n_c$ ,  $n_k$  – масові частки компонентів жому, соломи, комбікорму;

$\rho_{ж}$ ,  $\rho_c$ ,  $\rho_k$  – їх насипні маси.

Після обчислення об'ємів кожного компонента і об'єму суміші необхідно переконатися, що вологість суміші для кожного випадку в ході процесу може бути порівнянна зі значенням заданої величини. Невиконання цієї умови означає потребу в необхідних керуючих впливах, які змінять параметри стану агрегату за умови стабільних у технологічному потоці вхідних параметрів. Або: необхідною є зміна величини вхідних параметрів, отже, підключення попередніх агрегатів, якщо незмінними залишаються параметри стану.

Для якісного перебігу процесу необхідно знати час його здійснення, який можна визначити виходячи з відомої формули продуктивності змішувача (Новиков и др., 1987),

$$\tau = \frac{3600 \cdot G \cdot \cos \varepsilon \cdot \beta}{47,1(D - d_b)^2 \cdot S \cdot \psi \cdot n \cdot \rho}, \quad (1.59)$$

де  $S$  – крок лопатей або гвинтового шнека, що залежить від кута атаки;

$\psi$  – коефіцієнт заповнення;

$\beta$  – коефіцієнт, що враховує відставання лінійного переміщення маси до вантажувального вікна.

Вологість суміші можна визначити із такого співвідношення:

$$W = \frac{G_{ai}W_i + G_{ci}W_{ci} + G_{ki}W_{ki}}{G_{ai} + G_{ci} + G_{ki}} \quad (1.60)$$

Оцінка якості змішування враховує середньоквадратичне відхилення і зміну його значення в процесі перемішування (Чурсинов и др., 1984),

$$\sigma = (\sigma_0 - \sigma_k) \exp\left(-\frac{\tau_i}{T}\right) + \sigma_k \quad (1.61)$$

де  $\sigma_0$ ,  $\sigma_k$  – початкові та кінцеві значення середньоквадратичного відхилення компонента в працях знеси різної маси;

$T$  – постійна часу перемішування, що характеризує інтенсивність роботи змішувача і здатність компонентів до змішування.

Мінімальний час перемішування, що забезпечує задану однорідність суміші, визначається в такий спосіб:

$$\tau_{min} = \frac{\tau \ln(\sigma_0 - \sigma_k)}{(\beta - 1)\sigma_k} \quad (1.62)$$

Середньоквадратичне відхилення може бути представлено у вигляді:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (C_i - \bar{C})^2}{n-1}} \quad (1.63)$$

де  $C_i$  – концентрація  $i$ -го компонента;



$C$  – середня арифметична концентрація компонента;

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} ;$$

де,  $n$  – кількість проб.

Тоді коефіцієнт неоднорідності  $V_c$  в(%) отриманої суміші визначиться з виразу:

$$V_c = \frac{100}{\bar{C}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n-1}} = \frac{\sigma}{\bar{C}} \cdot 100 . \quad (1.64)$$

Ідеальною вважають умову, коли  $\sigma \rightarrow 0$ , тобто чим менше  $\sigma$ , тим більш однорідною є суміш.

У процесі змішування змінюються фізико-механічні властивості суміші. Кожен із компонентів має свої показники теплоємності  $C$ , теплопровідності  $\lambda$  та температуропровідності  $a$ , але залежно від пропорційного їх співвідношення коефіцієнти теплоємності, теплопровідності і температуропровідності будуть іншими. Визначалися величини коефіцієнтів для різних матеріалів технології – жом, паста, протеїновий концентрат гранульований та порошкоподібний, а також кореневі компоненти при брикетуванні – солома, комбікорм, суміші.

Коефіцієнт теплопровідності, що відображає кількість тепла, яка проходить в одиницю часу через одиницю поверхні при зміні температури на  $1^\circ \text{C}$  на одиницю довжини матеріалу, визначають з виразу

$$\lambda = \frac{Q}{F \tau \frac{\Delta t}{l}} , \quad (1.65)$$

Теплоємність розраховують за формулою

$$C_M = \frac{C_{c.b.} (100-10) + C}{100} \quad (1.66)$$

Коефіцієнт температуропровідності, що включає зв'язок між теплопровідністю і об'ємною теплоємністю (акумуляуючою здатністю суміші), визначають співвідношенням.

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}. \quad (1.67)$$

Проведені дослідження показали, що питома теплоємність кормових матеріалів підвищується від 2,292 до  $4,34 \cdot 10^3$  Дж/К, теплопровідність частинок висушеного концентрату, навпаки, зі зростанням температури зменшується від 0,126 до 0,1 Вт/К. Температуропровідність частинок у міру сушіння і втрати вологи знижується від  $0,117 \cdot 10^{-6}$  до  $0,680 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Зі збільшенням щільності температуропровідність незначно знижується. Дані використані при дослідженні алгоритму процесу.

Отримана математична модель, реалізуючись за розробленим алгоритмом (рис. 1.18), дозволяє врахувати і визначити необхідні для поставленого завдання вагові співвідношення кормових компонентів, розрахувати час змішування, зробити якісну оцінку у змішування. У разі невиконання заданих умов за розробленим алгоритмом створюється можливість керувати процесом, змінюючи параметри стану (зміна конструктивних параметрів змішувача, його швидкості обертання, кута атаки лопатей, числа лопатей та ін.).

Математична модель передбачає припущення, що процес змішування не впливає на якісні зміни кормових компонентів за час проходження їх через агрегат А4, тобто втрати білка і вітамінної частини кормових компонентів є нульовими ( $n_c = 0$ ).

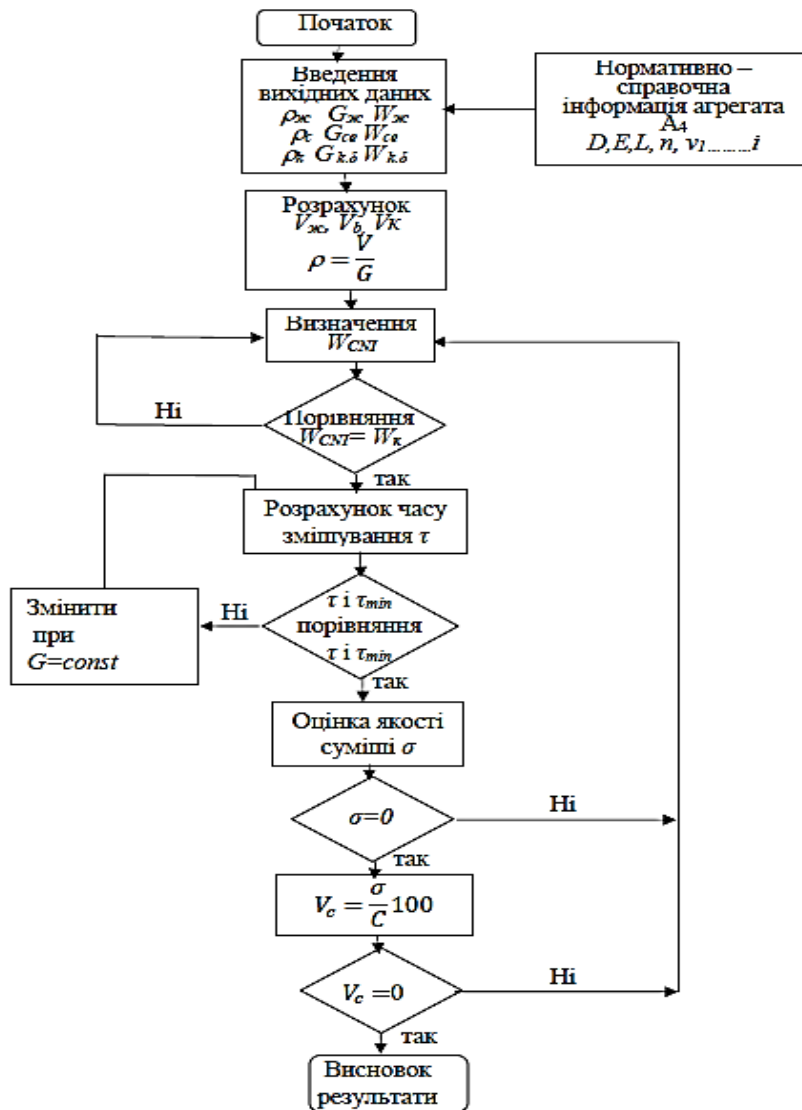


Рис. 1.18. Блок-схема алгоритму змішування кормових компонентів

Результати розрахунків за наведеним алгоритмом були використані для отримання реальних сумішей з необхідними технологічними обмеженнями. Середньоквадратичне відхилення по вологості склало 0,64 %, що дозволяє отримувати при використанні даної моделі суміш із зазначених компонентів за рекомендований час змішування з відповідною нормам вологістю.

### 1.1.2.6. Брикетування сумішей

За традиційних способів гранулювання-брикетування кормів спочатку їх висушують до вологості 10–12 %, дроблять у борошно або нарізають, зволожу-

ють до вологості 19–23 %, а потім гранують або брикетують. Волога сприяє зв'язуванню часток. У процесі гранулювання зайва волога під дією тиску і температури випаровується.

У підсистемі видаляють вологу з початкової маси спершу зневодненням, далі досушуванням, потім змішуванням підсушеного жому з більш сухими кормовими компонентами і перерозподілом вологи між ними; завершальним процесом задається брикетування суміші.

Якість роботи преса при брикетуванні визначається складом і вологістю суміші, її теплофізичними і реологічними властивостями, оскільки властивості деформації продуктів, які змішуються, є важливою характеристикою.

Розглядаючи параметричну схему процесу брикетування, бачимо, що на нього впливають кількість суміші  $G_c$ , її вологість  $W_c$ , теплофізичні та фізико-механічні властивості  $\xi_\delta$ , початкова температура суміші  $t_{н.с.м.}$ , температура навколишнього середовища  $T_o$ , додатковий тиск пресування  $P_\delta$ , час пресування  $\tau_\delta$ . Параметри стану враховують конструктивні характеристики преса: швидкість обертання матриці  $V_\delta$ ; товщину шару маси  $\Delta b$ ; діаметр живого перетину матриці  $d_n$ . Вихідними параметрами є вологість брикетів-гранул  $W_{k.\delta}$ , її температура  $t_{k.\delta}$ .

Поставлена задача полягає у визначенні режиму тиску пресування  $P_\delta$  при брикетуванні (рис. 1.19), який забезпечив би формування суміші і видалення певної кількості вологи  $\Delta W$  за рахунок підвищення температури  $t_\delta$  при тиску. Температура не повинна перевищувати граничної, коли можлива денатурація білка і втрата каротиноїдів.

Взаємозв'язок вхідних і вихідних параметрів відповідно до схеми (рис. 1.19) може бути представлений системою:

$$W_{k.\delta} = f(P_\delta, W_c, G_c, t_{н.с.м.}, \tau_\delta, \xi_\delta, T_o, V_\delta), \quad (1.68)$$

$$t_{k.\delta} = f(P_\delta, W_c, W_{k.\delta}, \tau_\delta, \xi_\delta, t_{н.с.})$$

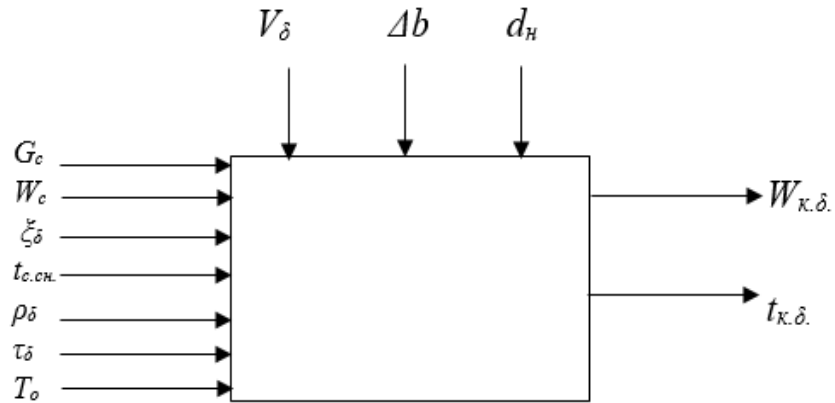


Рис. 1.19. Параметрична схема процесу брикетування суміші

Теплова енергія, що витрачається на випаровування вологи, дорівнюватиме

$$\Delta Q = L \cdot \Delta W, \quad (1.69)$$

де  $L$  – питома теплота пароутворення.

$$\Delta W = \left( \frac{W_{к.д.} - W_c}{100} \right) G_c. \quad (1.70)$$

Необхідно визначити частку механічної роботи преса  $A$ , яка перетворюється на теплоту  $Q$ .

$$Q = f_1(A) = f_2(P), \quad (1.71)$$

або звідси  $P = f(\Delta W, t)$ .

На процес брикетування, щільність одержуваного продукту, тиск пресування і температуру, великий вплив має довжина каналу матриці, яка відповідно до роботи науковця (Tchernov, 1996), визначається за формулою:

$$L = \frac{d}{4\xi f} \cdot \ln\left(\frac{\xi \cdot P}{q_0}\right), \quad (1.72)$$

де  $L$  – довжина каналу;

$f$  – коефіцієнт тертя матеріалу по сталі;

$\xi$  – коефіцієнт бокового тиску;

$q_0$  – тиск, обумовлений пружним розширенням спресованого матеріалу;

$d$  – діаметр каналу.

Розглянемо умовно стрижень довжини  $L$  (рис. 1.20), який під дією тиску  $P$  переміщується вздовж камери зі швидкістю  $V$ . Сила тертя стрижня об стінки камери, за даними науковця (Tchernov, 1996) визначається за рівнянням

$$F_{mp.} = S\left(\frac{g_o}{\xi} + P\right)\left(1 - e^{-\frac{l\xi f_{ck}}{S}(L-x)}\right) \quad (1.73)$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу камери;

$f_{ck}$  – коефіцієнт тертя ковзання;

$g_o$  – залишковий бічний тиск;

$l$  – периметр поперечного перерізу камери.

У результаті тертя стрижня об стінки частина механічної енергії буде перетворюватися на теплову. Тепловий потік бічної поверхні стрижня визначиться виразом через похідну по нормалі

$$Q = \lambda \frac{dT}{dn} = \frac{K_1}{J} \tau V, \quad (1.74)$$

де  $J = 4,1868 \text{ Дж / кал}$ ,

$$\tau = \frac{F_{mp.}(x)}{S_{\text{бок.}}(x)} \text{ – дотичне напруження,}$$

$V$  – швидкість ковзання;

$K_I$  – коефіцієнт пропорційності.

На підставі закону збереження кількості тепла можна записати рівняння теплопровідності:

$$\frac{dT}{dt} + V \frac{dT}{dt} = \alpha^2 \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{K_1}{J} V \cdot \tau(x) + \frac{K_2}{c\rho gJ} A, \quad (1.75)$$

де  $K_2 \cdot A$  – механічна робота внутрішніх сил, що переходить в тепло;

$c$  – теплоємність;

$\rho$  – щільність суміші.

У своїх дослідженнях автор (Tchernov, 1996) стверджує, що питома робота ущільнення може бути визначена з виразу:

$$A(x) = \frac{S}{G} \int_0^x C_1 \left( e^{a\gamma_0 \frac{x}{L-x}} - 1 \right) dx, \quad (1.76)$$

де  $G$  – вага матеріалу.

Відповідно до Закону Фур'є граничні умови на торцях стрижня мають вигляд:

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = \lambda \quad [T | x=0 - T_0] \quad (1.77)$$

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} = -\lambda \quad [T | x=L - T_0]$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплообміну.

У такий спосіб отримано нестационарне неоднорідне рівняння теплопро-

ВІДНОСТІ:

$$\frac{dT}{dt} + V \frac{dT}{dx} - \alpha^2 \frac{d^2T}{dx^2} = \frac{K_1}{J} V \tau(x) + \frac{K_2}{c \rho g J} A(x), \quad (1.78)$$

За граничних умов:

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = \lambda \quad [T | x=0 - T_0] \quad (1.79)$$

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} = -\lambda \quad [T | x=L - T_0],$$

за початкових умов:

$$T \Big|_{t=0} = \psi(x)$$

При розв'язанні рівняння (1.78) для спрощення математичного формулювання завдання перетворимо неоднорідні граничні умови (1.79) на однорідні.

Припустимо, що  $T = T_0 + v(x, t)$ , тоді:

$$\frac{dv}{dt} + \frac{dv}{dx} - \alpha^2 \frac{d^2v}{dx^2} = \frac{K_2}{c \rho g J} A(x)$$

$$\left. \frac{dv}{dx} \right|_{x=0} = \lambda v \quad ; \quad \left. \frac{dv}{dx} \right|_{x=L} = -\lambda v, \quad (1.80)$$

$$v(x, t) \Big|_{t=0} = \psi(x) \Big|_{-T_0}.$$

Конвективний член можна виключити з рівняння теплопровідності за допомогою введення нової невідомої функції:



$$\begin{aligned}
v(x,t) &= e^{\frac{2Vx-V^2t}{4d^2}} \cdot u(x,t) ; \\
\frac{du}{dt} &= \alpha^2 \frac{d^2u}{dx^2} + e^{\frac{-2Vx-V^2t}{4d^2}} \underbrace{\frac{K_1}{J} V \tau(x) + \frac{K_2}{c \rho g J} A(x)}_{f(x,t)} ; \\
\frac{du}{dx} \left( \begin{array}{l} \\ x=0 \end{array} \right. &= \left( \lambda - \frac{V}{2\alpha^2} \right) u \Big|_{x=0} ; \quad \lambda_1 = \lambda - \frac{V}{2\alpha^2} ; \\
\frac{du}{dx} \left( \begin{array}{l} \\ x=L \end{array} \right. &= -\left( \lambda - \frac{V}{2\alpha^2} \right) u \Big|_{x=L} ; \quad \lambda_2 = \lambda - \frac{V}{2\alpha^2} \\
u \left( \begin{array}{l} \\ t=0 \end{array} \right. &= e^{-\frac{Vx}{2d^2}} \psi(x) \Big|_{-T_0} = F(x) .
\end{aligned} \tag{1.81}$$

Знайдемо рішення однорідного рівняння. Власні вектори системи Штурма-Луївілля для однорідного завдання:

$$\begin{aligned}
\frac{du}{dt} &= \alpha^2 \frac{d^2u}{dx^2} , \quad \frac{du}{dx} \left( \begin{array}{l} \\ x=0 \end{array} \right. = \lambda \times v \Big|_{x=0} , \\
\frac{du}{dx} \left( \begin{array}{l} \\ x=L \end{array} \right. &= -\lambda_2 \times u \Big|_{x=L} \left( \begin{array}{l} u \\ t=0 \end{array} \right) = F(x) ,
\end{aligned} \tag{1.82}$$

є функції

$$x_n(x) = \cos \mu_n x + \frac{\lambda_1}{\mu} \cdot \sin \mu_n \cdot x ,$$

де  $\mu_n$  – корені трансцендентного рівняння

$$tg \mu \cdot L = \frac{\mu_n (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_n^2 - \lambda_1 \cdot \lambda_2} , \tag{1.84}$$

Розкладемо функцію  $f(x,t)$  у ряд по власних функціях  $x_n(x)$  (Сеник и др., 1984)

$$f(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) x_n(x) , \quad (1.85)$$

де

$$f_n(t) = \frac{1}{a_n} \int_0^L f(x, t) \cdot x_n(x) dx$$

$$a_n = \frac{L}{2} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\mu_n^2}\right) + \frac{\sin^2 \mu_n L}{4\mu_n} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\mu_n^2}\right) + \frac{\lambda_1}{\mu_n^2} \cdot \sin^2 \mu_n L . \quad (1.86)$$

Рішення  $u(x, t)$  будемо шукати у вигляді

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) x_n(x) ,$$

Тоді функції  $T_n(t)$  є розв'язками задачі Коші:

$$T_n'(t) + (\mu_n \alpha)^2 T_n(t) = f_n(t) ; \quad (1.86)$$

$$T_n(0) = a_n \int_0^L F(x) x_n(x) dx = b_n$$

Розв'язок цього завдання має вигляд:

$$T_n(t) = b_n \cdot e^{-(\mu_n \alpha)^2 t} + \int_0^t e^{-(\mu_n \alpha)^2 (t-\tau)} \cdot f_n(\tau) d\tau \quad (1.87)$$

Звідки

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n e^{-(\mu_n \alpha)^2 t} \cdot x_n(x) + \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^t e^{-(\mu_n \alpha)^2 (t-\tau)} \cdot f_n(\tau) d\tau \cdot x_n(x). \quad (1.88)$$

Перший доданок обумовлено початковими умовами, а другий – правою частиною рівняння – функцією  $f(x, t)$ .

Остаточне розв'язання задачі, виходячи з рівнянь (1.87) та (1.89), буде мати вигляд:

$$T(x, t) = T_0 + e^{\frac{2V \cdot V^2 t}{4\alpha^2}} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot e^{-(\mu_n \alpha)^2 t} \cdot x_n(x) + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \int_0^t e^{-(\mu_n \alpha)^2 (t-\tau)} \cdot f_n(\tau) d\tau \right) x_n(x) \right\},$$

$$\text{де } b_n = a_n \int_0^L F(x) x_n(x) dx;$$

$$a_n = \frac{L}{2} \left( 1 + \frac{\lambda_1^2}{\mu_n} \right) + \frac{\sin^2 \mu_n L}{4\mu_n} \left( 1 - \frac{\lambda_1^2}{\mu_n^2} \right) + \frac{\lambda_1}{\mu_n^2} \sin^2 \mu_n L;$$

$$x_n(x) = \cos \mu_n x + \frac{\lambda_1}{\mu_n} \sin \mu_n \cdot x, \quad \lambda_1 = \lambda - \frac{V}{2d^2}, \quad (1.89)$$

$$F(x) = e^{-\frac{V \cdot x}{2\alpha^2}} \cdot \psi(x) - T_0, \quad \lambda_2 = \lambda + \frac{V}{2d^2},$$

$$f_n(t) = \frac{1}{a_n} \int_0^L f(x, t) x_n(x) dx,$$

$$f(x, t) = e^{-\frac{2Vx - V^2 t}{4\alpha^2}} \left[ \frac{K_1}{J} V \tau(x) + \frac{K_2}{c \rho g J} A(x) \right].$$

Енергетична оцінка процесу брикетування включає визначення потужностей холостого ходу, потужностей брикетування сумішей і питомої витрати енергії на процес.

Потужність вимірюється в динаміці реєструючим ваттметром. Потужність холостого ходу в сталому режимі замірюється без включення технологічного потоку, причому знімаються характеристики можливих пікових наванта-

жень під час пуску преса, як без суміші, так і в аварійній ситуації в разі збивання і зупинки матриці.

Потужність, споживана, на процес визначається за вирахуванням на діаграму даних по потужності холостого ходу. Діаграма потужностей обробляється методом ординат з використанням формули перерахунку:

$$N_{\delta} = \frac{N_{кр.} \cdot K_{срi} \cdot n_i}{ш}, \quad (1.90)$$

де  $N_{кр}$  – граничне значення шкали потужності самописця, кВт;

$K_{срi}$  – середнє значення ординати, мм;

$n_i$  – коефіцієнт трансформації;

$ш$  – ширина стрічки діаграми.

$$K_{срi} = \frac{\sum K_i}{\sum P_i} \quad (1.91)$$

де  $\sum K_i$  – сума значень ординат, мм;

$\sum P_i$  – сума вимірів ординат.

Виконання завдання, пов'язаного з перебуванням раціональних режимів процесу за розробленим алгоритмом (рис. 1.20) допомагає варіювати тиском, продуктивністю процесу та іншими параметрами, які забезпечують отримання якісних кормів із кормових сумішей шляхом використання внутрішніх тепло- і масообмінних процесів.

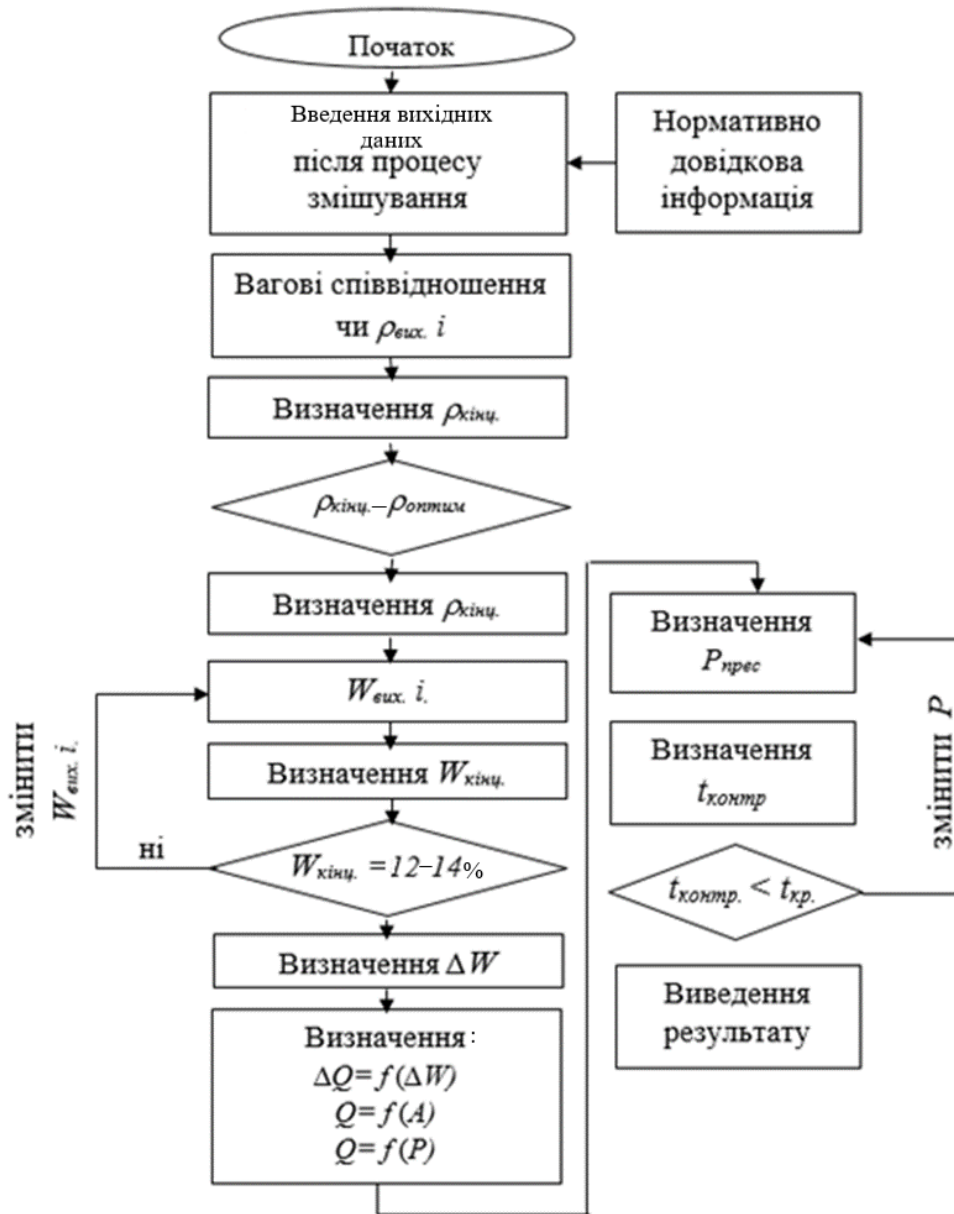


Рис. 1.20. Блок-схема алгоритму брикетування сумішей

Питома витрата енергії на процес визначається за формулою

$$q_{\delta} = \frac{N_{\delta}}{Q_{\delta}}, \quad (1.92)$$

де  $N_{\delta}$  – потужність, споживана на процес з урахуванням ККД передачі, кВт;

$Q$  – середня продуктивність брикетувальника, т/год.

Такий контроль за енерговитратами дозволяє підійти диференційовано до керування процесом за умови мінімуму енерговитрат.

## 1.2. Коагуляція соку люцерни та амаранту

В одному з основних процесів технології внаслідок теплового впливу на сік відбувається агрегування білкових з'єднань, здатних надалі виділятися з розчину в результаті подальших технологічних операцій, наприклад фільтрації, седиментації або центрифугування.

Оптимальні режими процесу мають тут найважливіше значення, оскільки від них залежать максимальний вихід і якість листового протеїну.

Розглянемо вибір структури моделі процесу теплової обробки соку, спрямованої на визначення раціональних параметрів процесу за умови максимуму збереження нативних властивостей продукту і мінімуму енерговитрат на його отримання.

Процес коагуляції білків соку рослин включає підготовку вихідного матеріалу, зміну його кислотності з метою збереження нативних властивостей, теплову обробку до температури найбільш повної коагуляції білків. Далі за допомогою центрифугування або фільтрації відбувається виділення часток листового протеїну у вигляді пасти, яку потім можна консервуватися хімічними реагентами або сушінням.

Виходячи зі структурно-функціональної схеми процесу коагуляції соку зелених рослин (рис. 1.21), розглянемо фактори, які впливають на досліджуваний процес.

Загальна модель процесу коагуляції соку може бути представлена системою:

$$\begin{cases} y=f_1(t_k, PH_k, \tau) \\ t_k=f_2(\tau, t_c, G_c, G_n, P_n) \\ PH_k=f_3(PH_c, G_c, G_{a.b.}) \\ \tau=2l / G_c + \tau_b \end{cases} \quad (1.93)$$

де  $y$  – кількість скоагульованого білка;

$t_k$  – температура коагуляції;

$PH_k, PH_c$  – кислотність коагуляту та соку, відповідно;

$\tau, \tau_b$  – тривалість нагріву та час витримки;

$t_c$  – температура соку;

$G_c$  – швидкість подачі соку;

$G_n$  – кількість пари;

$P_n$  – тиск пари;

$G_{a.b.}$  – кількість аміачної води (кислоти), кількість аміачної води (кислоти);

$L$  – довжина коагулятора.

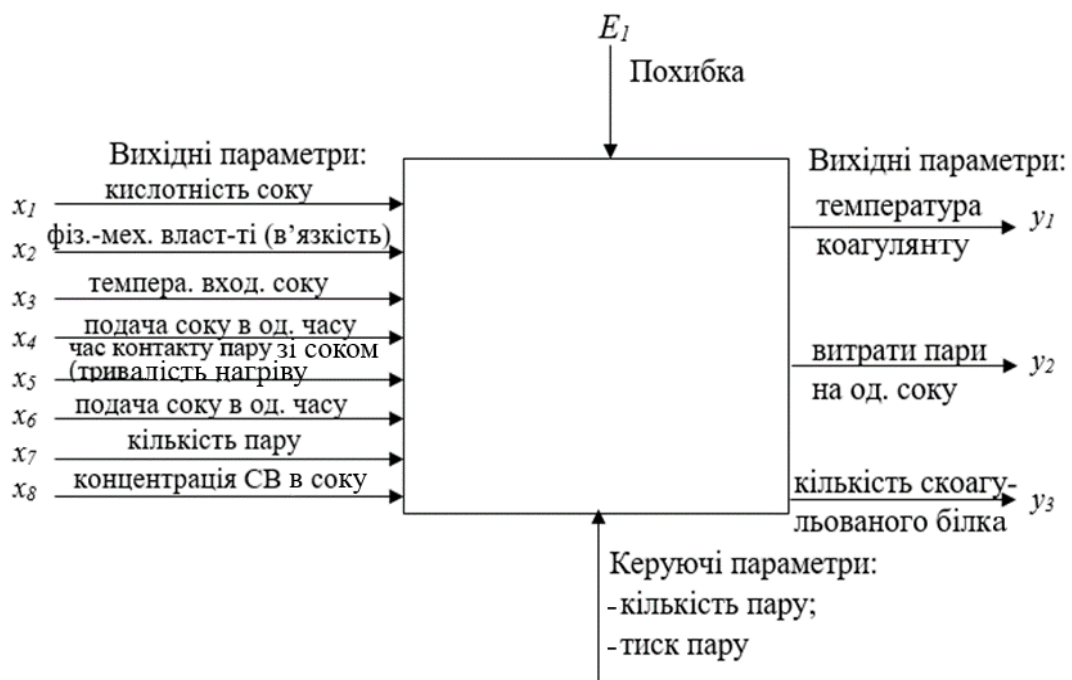


Рис. 1.21. Параметрична схема процесу коагуляції

Регресійна модель може бути використана як  $f_1$ . Залежність  $f_2$  повинна враховувати якість засвоєння білка (відсутність його денатурації і переходу в незасвоєвані форми), забезпечити оптимальну структуру білка в коагулятор для кращого режиму поділу. Температурний режим, що змінюється в часі, визначається експериментально для оптимальної якості засвоєння білка, тобто

для опису  $f_2$  можна використовувати таку експериментальну залежність з урахуванням теплового і матеріального балансів. Надалі виконання цього завдання, а саме залежність ступеня денатурації білка від температури і тривалості нагріву, може бути виділено в певний модуль і використано для оптимізації всіх теплових процесів.

Із сукупності вхідних, вихідних і керуючих параметрів необхідно визначити головні, значущі і розглянути модель процесу (рис.1.21).

Однак вибір математичної моделі процесу буде правильний лише в тому випадку, якщо процес розглядається з позицій: як він відбувається, і чому він відбувається саме так, а не інакше? З одного боку, з позицій системного підходу необхідно виконати синтез системи, тобто по заданому співвідношенню між вхідними та вихідними параметрами встановити параметри даної системи і вичленувати головні фактори. З іншого боку, розглянути функціонування системи на мікрмолекулярному рівні, тобто обговорити кінетику процесу та визначити головні фактори процесу.

Для того щоб визначити на основі дослідження процесу закон його функціонування, необхідно розглянути процес із двох принципово різних точок зору:

- провести аналіз фізичних явищ, що мають місце в даному процесі;
- дослідити взаємодію деяких основних характеристик процесу, які є похідними (відображенням) фізичних явищ та мають місце для даного процесу.

Такий двосторонній розгляд процесу значною мірою підвищує точність обраних факторів і збільшує вірогідність певної моделі.

На основі спостережень процесу, аналізу його фізичної сутності, побудови і аналізу концептуальної моделі пропонуються певні основні фактори, які впливають на процес коагуляції (передусім на температуру нагріву, кислотність соку, тривалість нагріву і, як вихідний визначальний параметр – на кількість скоагульованого білка).

Далі розглянемо кінетичну модель процесу і визначимо головні фактори, а також перевіримо правильність їх вибору по концептуальній моделі.



Коагуляція білків являє собою складний біохімічний процес, в якому на його кінетику накладаються, залежність від апаратного оформлення, ефекти тепло- і масопереносу. Тому доцільно проводити побудову моделі апарата з огляду на структурний аналіз: розчленування складного процесу на елементарні складові; вивчення закономірностей процесів у межах нижнього рівня і побудова знакової моделі; синтез моделі процесу з моделей нижнього рівня. Із цієї точки зору структурна послідовність моделювання коагулятора – як апарата для здійснення процесу – виглядає певним чином (рис. 1.22).

За визначенням кінетична модель процесу – це система рівнянь реакцій, яка побудована без урахування особливих ефектів тепломасопереносу. В основі побудови моделі лежать уявлення про механіку окремих стадій реакції денатурації білків. Після обґрунтування схеми перетворення білків, на основі закону діючих мас складаємо систему диференціальних рівнянь кінетики, до якої входять як правило невідомі параметри – константи швидкості стадій енергії активації і порядок окремих реакцій.

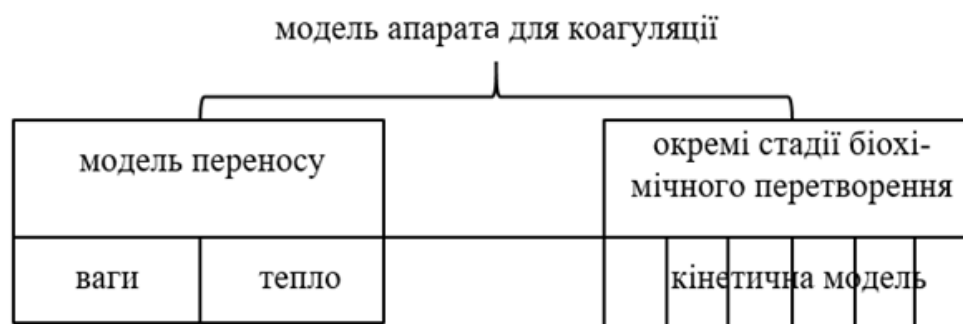
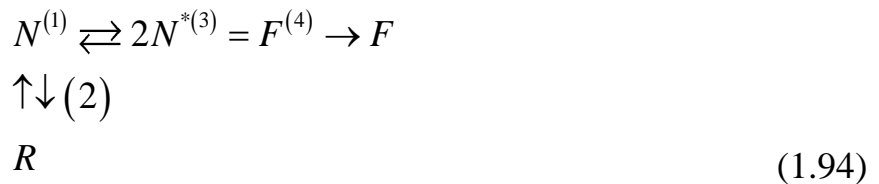


Рис. 1.22. Структура моделі коагулятора

Параметри визначаємо робастних методом найменших квадратів і, використовуючи статистичні процедури, перевіряємо адекватність моделі.

Узагальнюючи відомі дані (Долинский, Малецкая, 1968; Марчевский, 1984; Мельников и др., 1980; Новиков, 1979; Tchernov 1996) по денатурації різних білків (сироваткових альбумінів, гемоглобіну та ін.), можна запропонувати схему перетворення нативних білків у денатуровані:



де  $N^{(2)}$  – нативний білок у неактивній формі;

$N^*$  – нативний білок в активній формі;

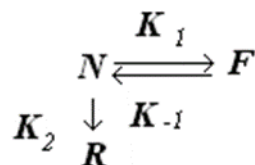
$F^*$  – денатурований білок в активній формі;

$F$  – необоротно денатурований білок;

$R$  – білок, стійкий до денатурації в даних умовах.

Активна форма білка може являти собою вихідний білок зі зміненою конфігурацією. Лімітуючою стадією є зазвичай стадія  $I$ , того часу як агрегація активних частинок (стадія 3) відбувається швидко.

Змінні  $N^*$  та  $F^*$  в експерименті зазвичай не спостерігаються. Тому, використовуючи метод стаціонарних концентрацій Боденштейна–Семенова, їх можна виключити. Тоді рівняння маршрутів реакцій запишемо в такий спосіб.



Стадія (2) за своєю природою є незворотною, оскільки відсутні переходи білків із форми  $R$  у цитоплазматичні та хлоропластні форми.

На практиці залежність ступеня денатурації часто описують рівняннями першого порядку, хоча експериментальні дані (зміна константи швидкості) свідчать про денатурацію в області реакції, близької до квазірівноважної.

Тому для перетворення нативного білка доцільно прийняти  $n$ -ний порядок по речовині, який потім можна визначити з використанням експериментальних даних. Рівняння кінетичної моделі матиме вигляд:

$$\frac{dC_N}{dt} = K * C_N^n \quad \text{при } t = 0, \quad C_N = C_N^0$$

(1.95)

Розв'яжемо рівняння:

$$C_N(t) = C_N^0 \left( 1 + K * C_N^{n-1} (n-1) t \right)^{-\frac{1}{n-1}}$$

(1.96)

Але динаміку коагуляції протеїнів при нагріванні (від температури) можна описати як процес першого порядку, де константи швидкості денатурації підкоряються нормальним термодинамічним принципам:

$$\frac{d \ln K_{den}}{dT} = \frac{E_{act}}{RT^2},$$

(1.97)

де  $E_{act}$  – енергія активації дорівнює  $\Delta H^+ + RT$ ;

$\Delta H^+$  – ентальпія активації.

Роль енергії активації в даному рівнянні значною мірою відрізняється від нормальних хімічних процесів, тому швидкість денатурації швидко змінюється зі зміною температури. Отже, одним із основних параметрів, які впливають на процес, є температура.

Далі розглянемо вплив кислотності на процес коагуляції.

Встановлено, що рН розчину суттєво впливає на умови коагуляції білків (Новиков и др., 1986). Якщо факторів дії на розчин декілька, то ці дії можуть бути адитивними, що підсилюють одна одну. Отже, до розглянутого нами температурного фактора додається фактор кислотності. Швидкість теплової коагуляції, поява агрегатних з'єднань збільшуються з підвищенням температури експоненціально. Тривалість нагріву  $\tau$  і наведена в'язкість розчину пов'язані спів-

відношенням

$$\xi_{i\delta} = 4(f\tau)^{pH, T, \mu} \quad (1.98)$$

де  $T$  – температура нагріву;

$\mu$  – іонна сила.

Далі, якщо ввести ступінь перетворення нативного білка

$$x = \frac{C_N^0 - C_N^{(t)}}{C_N^0} \quad (1.99)$$

то концентрація денатурованого білка  $F$  у будь-який момент часу визначається з виразу

$$C_F(t) = C_N^0(1-x). \quad (1.100)$$

Як бачимо з виразу (1.98), кінетичну модель процесу характеризують такі фактори, як кислотність рН і температура  $T$ . Щоб більш повно вивчити процес, розглянемо і знакову модель апарата для здійснення даного процесу.

Оскільки вихідний матеріал, рослинний сік та пара надходять в ежекційну зону змішування апарата з великою швидкістю, то в ньому приймається режим ідеального перемішування, в результаті чого відбувається практично миттєве усереднення концентрації і температури в обсязі потоку. Режим ідеального перемішування дозволяє при побудові моделі процесу знехтувати умовами масо-переносу. Тоді тривалість нагріву соку до повної коагуляції білка в ньому можна визначити з виразу:

$$\tau = \frac{C_N^{0(1-n)}}{K * (1-x)^n} . \quad (1.101)$$

Час перебування в апараті пов'язаний з конструктивними характеристиками пристрою в подальшій процедурі:

$$t_{\Delta} = \frac{V_z}{G} , \quad (1.102)$$

де  $V_z$  – обсяг апарата (зона ежектування плюс відстійна зона), м<sup>3</sup>;

$G$  – витрата компонентів, м<sup>3</sup>/с.

Таким чином, крім кислотності рН, температури теплової обробки  $T$ , на кількісний вихід білка, виходячи з кінетики процесу коагуляції білків соків рослин, суттєво впливає такий фактор, як час нагрівання  $\tau$  або час тривалості перебування соку в апараті під температурною обробкою.

Зіставляючи результати аналізу концептуальної і кінетичної моделей процесу, можемо дійти висновку про збіжність і достовірність знайдених головних вхідних і вихідних факторів процесу теплової обробки соку зелених рослин. У цьому випадку другорядними факторами можна знехтувати. Тому обговорити і побудувати математичну модель процесу, що відображає суть технологічного процесу і зв'язує його фізичні режими, ми можемо тільки зі знайденими головними параметрами: вхідними – кислотність соку, температура нагріву, тривалість нагріву, вихідними – кількість скоагульованого білка.

Для визначення температури, умов роботи моделі апарата для коагуляції з урахуванням моделей переносу маси і тепла; виду теплоносія (пари, що гріє воду і т.ін.) і виходячи з початкової і кінцевої температури соку, що переробляється і початкової температури пара, скористаємося рівнянням теплового балансу:

$$Q = m_1 c_1 (t_{1i} - t_{2k}) = m c_2 (t_{2k} - t_{1i}), \quad (1.103)$$

де  $m_1$  – масова витрата пари, що гріє, кг/с;

$C_1$  – питома теплоємність пари, що гріє, Дж (кг · К);

$t_{1н}, t_{1к}$  – температура гріючої тіла на вході та виході ° С;

$m_2$  – масова витрата соку, який нагрівається, кг/с;

$C_2$  – питома теплоємність соку, Дж (кг · К);

$t_{2н}, t_{2к}$  – температура соку на вході і виході, ° С.

Температури теплоносія змінюються як по перетину потоку внаслідок наявності поля температур і швидкостей, так і вздовж проточної частини апарата для коагуляції в результаті охолодження гарячого середовища і нагрівання холодного. При конденсації пари і кипінні рідини температури теплоносія приймаються постійними як температури фазового перетворення.

За відносної різниці температур теплоносія в кінцевих точках апарата для коагуляції можна з достатньою для технічних розрахунків точністю визначити середній температурний напір як середньоарифметичну величину, тобто прийняти, що

$$\Delta t_{cp.} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_M}{2}, \quad (1.104)$$

де  $\Delta t_{\delta}$  – температурний напір (різниця температур теплоносія в кінцевих точках) у тій частині апарата, де він більше, °С;

$\Delta t_M$  – температурний напір на іншому кінці поверхні.

З урахуванням викладеного, реальну схему технологічного процесу можна представити в такому вигляді (рис. 1.23):

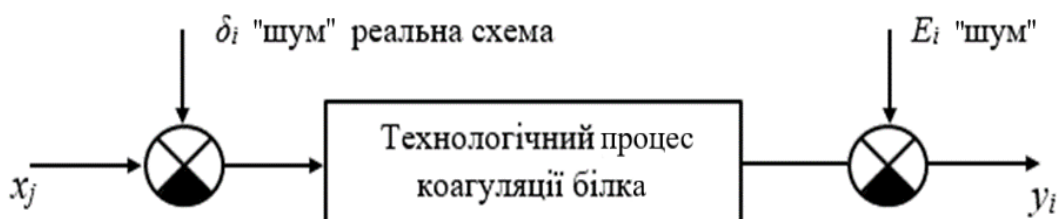


Рис. 1.23. Реальна схема технологічного процесу

На технологічний процес впливають вхідні параметри і похибка «шум»  $\delta_i$ . Якщо розглянути в розкритому вигляді систему рівнянь, яка визначає залежність вихідних параметрів від деякої сукупності вхідних, та отримаємо:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1x_{12}x_{13}\dots x_{1m} \\ 1x_{22}x_{33}\dots x_{2m} \\ \dots \\ 1x_{n2}x_{n3}\dots x_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \dots \\ \beta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_4 \\ E_n \end{bmatrix} \quad (1.105)$$

$$y_i = f_i(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) + \varepsilon_i.$$

Стохастичну модель, що об'єднує даний процес, можна описати рівнянням:

$$y_i = \sum_{j=1}^M f_j(x_j, \beta_j) + \varepsilon_i; \quad j = 1, M; \quad i = 1, N, \quad (1.106)$$

де  $M$  – кількість вхідних параметрів;

$N$  – кількість спостережень.

Суворих математичних методів, що дозволяють точно визначати процес в умовах статистичного ансамблю, не існує: будь-яка ймовірнісна модель є лише деяке наближення до досліджуваної реальності.

Запропонована нами модель – регресійні рівняння – є моделлю, яку використовують для обґрунтування параметрів і керування процесом коагуляції. Тому ми накладаємо на неї низку припущень:

- 1) модель повинна бути перешкодостійкою – роботоздатною;
- 2) випадкові дії  $\varepsilon_i$  мають закон розподілу «сумарної» помилки, що більш реалістично, ніж прийняття одного конкретного виду розподілу.

Закон «сумарної помилки»

$$P(x) = (1 - \delta)H(x) + \delta G(x) , \quad (1.107)$$

де  $\delta$  – мале позитивне число;

$H(x)$  – нормальний закон розподілу;

$G(x)$  – деякий «невідомий» закон розподілу.

У зв'язку з розміщеною інформацією необхідно провести «прикладання» і доопрацювання математичного інструментарію стосовно конкретної специфіки розв'язуваного реального завдання. Це «прикладання» методів регресійного аналізу знаходить свій вираз в алгоритмі, оцінюванні коефіцієнтів регресійного рівняння.

### **1.3. Розділення коагулята фільтрацією та центрифугуванням**

Скоагульований сік є суміш двох фракцій, двофазної дисперсної системи типу «тверде тіло-рідина». Тверда фракція складається з білкових частинок – пластівців різного розміру; рідка фракція – це коричневий сік, який являє собою розчин цукрів, вітамінів та інших речовин.

Одержуваний коагуляцією агрегований білковий згусток, як біологічно активну добавку, необхідно виділити зі суспензії коагуляту відстоєм, фільтрацією або центрифугуванням. Центрифугування є одним з найбільш поширених промислових способів розділення неоднорідних рідких систем на фракції. Відстійні центрифуги призначені для розділення суспензій, які погано фільтруються, для емульсій, тонких шламів, а також для розділення суспензій з об'ємною концентрацією твердої фази від 1 до 50 % і величиною частинок від 5 до 500 мк (Tchernov. 1996).

Аналіз процесу показує, що для поділу скоагульованого зеленого соку рослин на фракції в технології виробництва біологічно активних добавок доцільно застосовувати безперервно діючі і дискретні осаджувальні центрифуги, переважно зі шнековим вивантаженням осаду.



Показники роботи центрифуги залежать від геометричних розмірів ротора  $D_p$ , швидкості його обертання  $V_p$ , діаметра зливного циліндра  $d_c$ , від концентрації пасти у вихідному коагуляті (кількість скоагульованого білка), кута нахилу витка робочого шнека, щільності і дисперсного складу твердої фази розділюваного білка  $\xi$ , який розділяється від форм зв'язку вологи з твердими частинками, в'язкості рідкої фази  $\eta_j$ , продуктивності потоку  $Q_n$  та від інших факторів (Tchernov. 1996).

Виходячи з параметричної схеми процесу поділу (рис. 1.24), кількість виділеного з коагуляту білкового згустку та того, що залишився в невиділеному коричневому соку (фугаті, фільтраті), може бути визначено з рівняння матеріального балансу:

$$\mathcal{E} = \frac{C_n (C_{исх.} - C_\phi)}{C_{исх.} (C_n - C_\phi)} \cdot 100, \quad (1.109)$$

де  $E$  – ефективність відділення входящого компонента, %;

$C_n, C_{исх.}, C_\phi$  – концентрація входящого компонента в пасті, вихідному продукті та фугаті, %.

Аналіз рівняння (1.108) показує, що для визначення ефективності відділення пасти необхідно експериментально визначити її концентрацію у вихідному коагуляті, тобто у фугаті.

Одним із визначальних факторів, що роблять істотний вплив на якісний склад продуктів поділу у відцентровому полі, є тривалість перебування розділяється продукту, який розділяється в роторі центрифуги, значення якого вибирається з урахуванням тривалості осадження твердих частинок пасти, що витягується з коагуляту (рис. 1.24).

Теоретичне визначення тривалості осадження твердих частинок засноване на загальній закономірності гідродинаміки руху твердого тіла в рідкому середовищі.

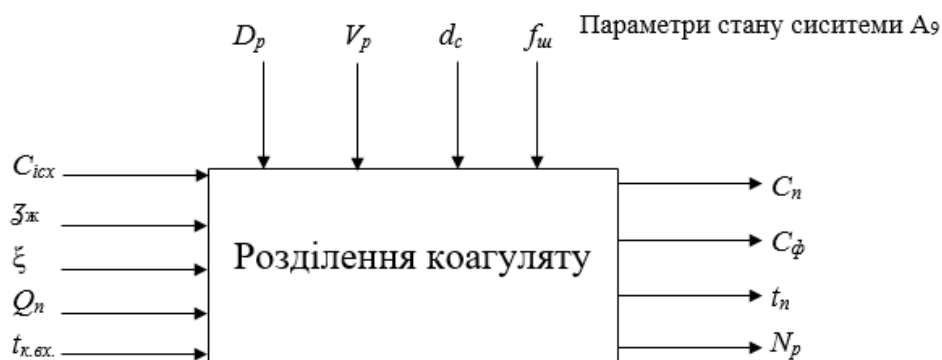


Рис. 1.24. Параметрична схема процесу поділу коагуляту.

Одним з основних критеріїв оцінки роздільної здатності центрифуги є фактор поділу:

$$F_r = \frac{\omega^2 R}{g}, \quad (1.109)$$

де  $\omega = \frac{\pi n}{30}$  – кутова швидкість обертання ротора центрифуги,  $\text{сек}^{-1}$ ;

$R$  – радіус ротора, м;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$n$  – частота обертання ротора центрифуги,  $\text{хв}^{-1}$ .

Фактор поділу показує, у скільки разів відцентрове прискорення, що розвивається в центрифугі, більше за прискорення вільного падіння. Отже, чим більше фактор поділу ( $F_r$ ), тим інтенсивніше повинен перебігати процес виділення білкових фракцій зі скоагульованого зеленого соку.

Водночас величина фактора поділу не може бути безмежною. Фактор відстійних центрифуг загального призначення обмежений:  $F_r \leq 3500$ .

Головними факторами, що визначають підхід до вибору основних характеристик центрифуги для поділу коагуляту соку зелених рослин на фракції, є: дисперсність твердої фази; ефективна щільність твердих частинок і їх концентрація в одиниці об'єму суспензії; в'язкість дисперсійного середовища.

Швидкість руху потоку всередині ротора центрифуги можна виразити рівнянням

$$V_n = \frac{Q_n}{S} = \frac{Q_n}{\pi D_{\text{св.}} L} \quad (1.110)$$

де  $Q_n$  – об’ємна продуктивність центрифуги по продуктивності, м<sup>3</sup>/с;

$S$  – поперечний переріз потоку, що рухається, м<sup>2</sup>;

$D_{\text{вц}}$  – діаметр корпусу циліндра, м;

$L$  – відстань від точки введення коагулята до зливних вікон ротора, м.

Для визначення швидкості руху потоку скористаємося рівнянням Стокса для осадження частинок у гравітаційному полі, в якому прискорення вільного падіння замінимо центральною силою:

$$V_o = \frac{d^2 (\rho_2 - \rho_c) \omega^2 R}{18\mu} \quad (1.111)$$

де  $d$  – діаметр елементарної частинки, м;

$\rho_2$  – щільність частинки, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_c$  – щільність суспензії, кг/м<sup>3</sup>;

$R$  – відстань від частинки до осі ротора, м;

$\mu$  – динамічна в’язкість суспензії, кг с/м<sup>2</sup>.

Для визначення швидкості осадження частинок коагуляту в цьому потоці, рух яких не підкоряється закону Стокса, скористаємося універсальним рівнянням, аналогічним параболічному закону фільтрування:

$$\rho = AdV_o + Bd^2V_o^2, \quad (1.112)$$

де перший член ураховує сили тертя, а другий – сили інерції частинок.

Об'ємна сила тримає в облозі у відцентровому полі частинки і виражається рівнянням

$$C = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_r - \rho_c) \omega^2 R. \quad (1.113)$$

Складність процесу відділення білкової фракції зі скоагульованого соку зелених рослин обумовлена тим, що за фізико-механічними і реологічними властивостями білкових частинок коагулят являє собою багатоскладову полідисперсну систему. Отже, виходячи з математичного опису процесу, для оцінки якості поділу коагуляту центрифугуванням можна допустити, що зміна властивостей коагуляту в процесі переробки нерівномірна, а розподіл полідисперсійній завислих речовин у рідкому середовищі незначний і не має великого впливу на закономірності функціонування процесу.

Алгоритм функціонування процесу поділу коагуляту представлений на (рис. 1.25).

#### **1.4. Сушіння біологічно активних кормових добавок**

До типових нестационарних процесів, що перебігають зі змінною (спадаючою) швидкістю, належить сушіння; розрахунок кінетики процесу виявляє значні труднощі.

При вирішенні завдань щодо вдосконалення технології та техніки сушіння, як енергоємного процесу, зусилля спрямовуються на пошук нових методів і механізмів, які забезпечують зниження витрат ресурсів, створення безвідходних технологій, отримання продукту зі заданим фізико-хімічними та структурно-механічними властивостями, визначення раціональних режимів сушіння на основі нових досягнень теорії тепло- і масообміну.

Як технологічний процес, сушіння може слугувати прикладом складної системи, структура якої являє собою сукупність елементів, між якими існує матеріальний, енергетичний та інформаційний зв'язок.

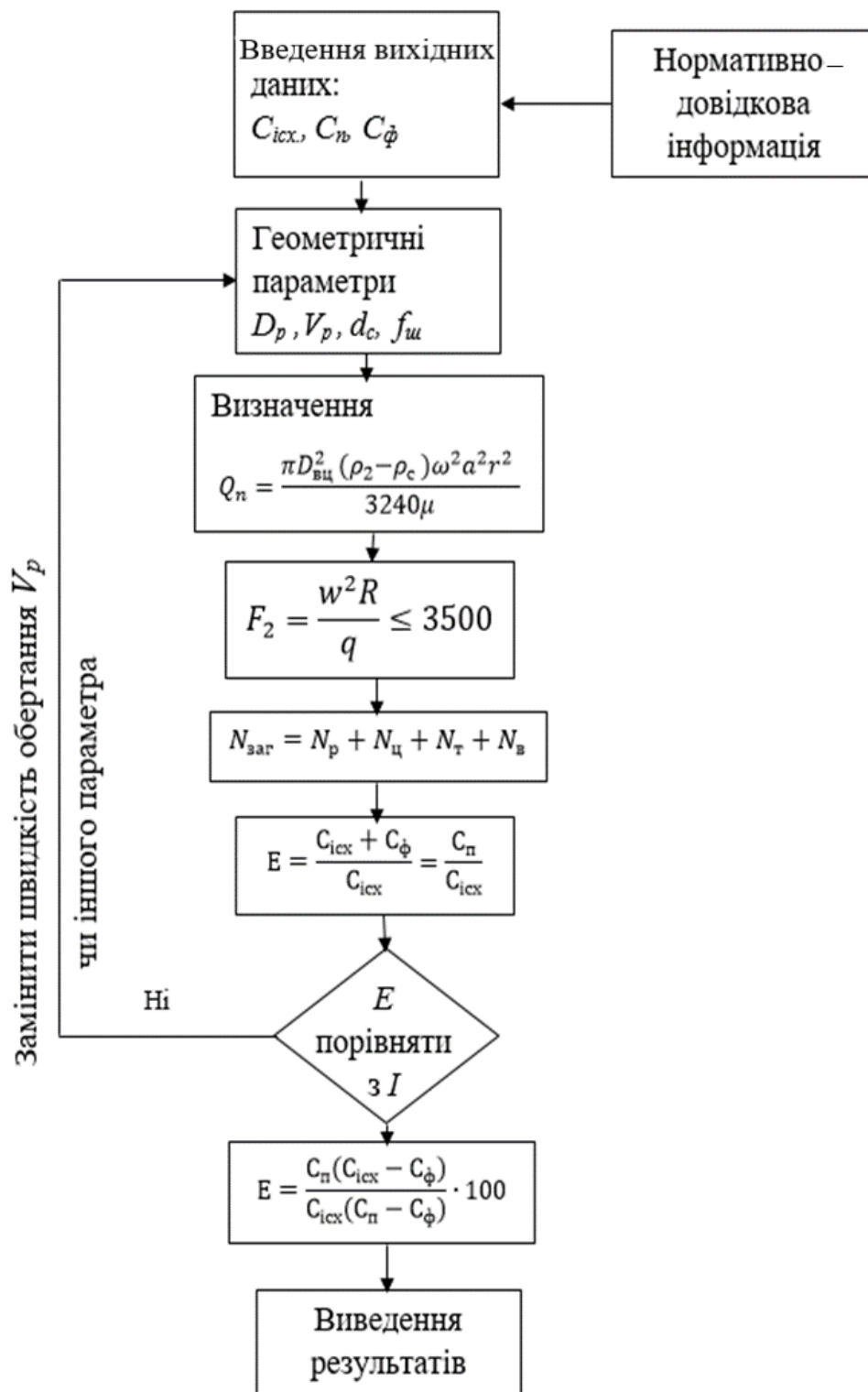


Рис. 1.25. Блок-схема процесу поділу коагулята центрифугуванням

Реальна фізична модель сушіння може бути формалізована за такою схемою: потоки суцільного середовища, що характеризуються вектором вхідних змінних  $\bar{u}$ , під впливом технологічного оператора перетворюються у вектор вихідних змінних (Кобозев, 1984; Tchernov. 1996).

$$\bar{y} = f(u). \quad (1.114)$$

Технологічний оператор підпорядковується принципу суперпозиції «елементарних» операторів (хімічних, біохімічних і фазових перетворень, молекулярного і молярного перенесення речовин і теплоти та ін.). Реальна залежність може бути замінена математичною моделлю

$$y = \Phi(u, x)\tau. \quad (1.115)$$

*Функціональний оператор  $\Phi$ , змінні стану об'єкта  $x$  ( $\tau$ ).* До процесів сушіння застосовані основні закони теплотехнічних процесів трьох груп:

а) закони, що встановлюють кількісні співвідношення (фундаментальні закони збереження маси і енергії). На їх основі зроблені матеріальні та енергетичні баланси. Для оцінки ефективності процесу застосовують не тільки енергетичний, але й ексергетичні аналізи, тобто враховують не тільки кількість, але і якість енергії, що витрачається;

б) закони, що встановлюють рівноважні співвідношення між парціальним тиском над поверхнею матеріалу і в навколишньому середовищі, енергію зв'язку вологи з матеріалом і роботу відриву вологи від матеріалу;

в) закони, що стверджують швидкість процесів, їх кінетику і динаміку (закони тепло- і масообміну, тепломасопереносу).

При сушінні у віброкиплячому шарі забезпечується кипіння не тільки витратою і швидкістю повітря, але і механічними коливаннями. Тому кількість теплоносія можна орієнтувати на основний процес; це видалення вологи з матеріалу. Оскільки швидкість повітря в цьому випадку нижча за критичну, то це зумовлює зниження втрат з відпрацьованим агентом і сприяє підвищенню енергетичного ККД сушильної установки.

На вихідні параметри процесу вібросушіння, виходячи з параметричної схеми (рис.1.26), впливають вхідні параметри (регульовані): температура теп-

лоносія ( $t_m$ ); температура початкова гранульованої пасти ( $t_n$ ); фізико-механічні та теплофізичні властивості гранульованої пасти ( $\lambda_\theta$ ); вологість початкова гранул  $W_n$ ; товщина шару гранул ( $h_\theta$ ); частота коливань віброрешітки ( $\psi_\theta$ ); амплітуда коливань ( $\Delta l$ ); швидкість теплоносія,  $v_m$ ; кількість теплоносія в одиницю часу ( $B_m$ ); кількість, що надходить вологою пастою у вигляді гранул ( $G_n$ ).

Параметри стану визначаються площею газорозподільної решітки ( $F_\theta$ ); числом зон сушіння (віброрешіт) і довжиною кожного решета ( $l_\theta$ ); живим перетином решета ( $S_s$ ). До вихідних параметрів належать: кінцева вологість продукту ( $W_k$ ); тривалість процесу ( $\tau$ ); температура нагріву матеріалу ( $t_\theta$ ); температура відпрацьованого теплоносія ( $t_{\theta\theta}$ ); кількість висушеного продукту в одиницю часу ( $G_{n.k}$ ); енерговитрати процесу ( $N_\theta$ ).

Основними параметрами, що визначають хід процесу, а також від яких залежать якісні показники продукту, є тривалість сушіння, вологість матеріалу на виході зі сушарки і температура його нагріву.

Оцінка ефективності процесу враховує не тільки кількість, але і якість енергії, що витрачається:

$$G_{\delta.n.} = G_{n.k.} + u ; \quad (1.116)$$

$$Q_{вх.} = Q_{пол.} + Q_{пот.}$$

$$\eta_{ан.} = Q_{пол.} / Q_{вх.}$$

де  $G_{\delta.n.}$ ,  $G_{n.k.}$  – співвідношення маси сирого (білкової пасти) та висушеного продукту (білково-активної речовини);

$u$  – маса випареної вологи з пасти;

$Q_{вх.}$ ,  $Q_{пол.}$ ,  $Q_{пот.}$  – співвідношення енергії вхідної, корисної та втраченої.

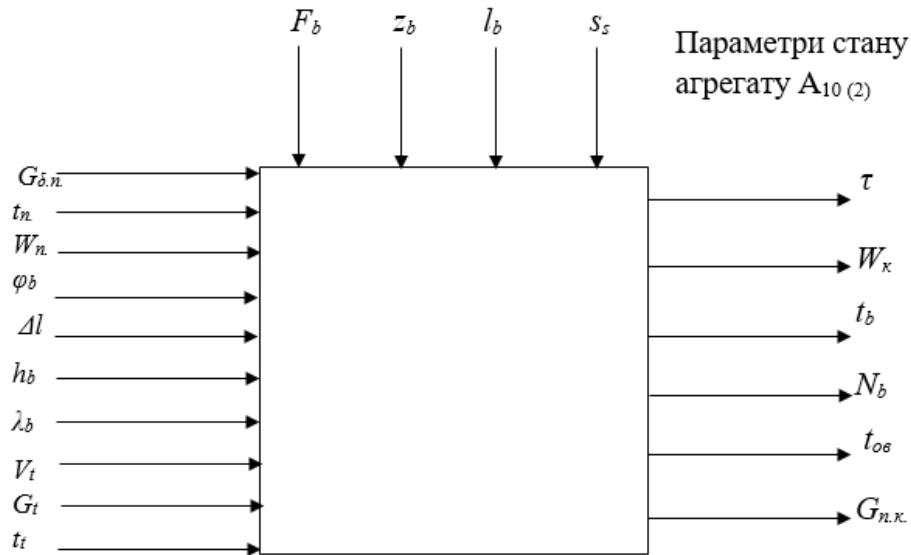


Рис. 1.26. Параметрична схема процесу сушіння у віброкиплячому шарі

Як об'єкт досліджень взята багатокамерна вібросушарка безперервної дії, функціонування процесу в якій полягає в прийомі вологого гранульованого пастоподібного матеріалу, його сушіння та вивантаження в готовому вигляді (рис.1.27). Тут:  $\left(\frac{M_c}{F_p}\right)$  – питоме навантаження продукту на газорозподільну решітку,  $\text{кг/м}^2$ ;  $V_{ti}$  та  $t_{ti}$  – швидкість і температура в  $i$ -тій зоні, відповідно  $u_n$ ,  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ ,  $u_k$  – вологовміст продукту спочатку, по зонах сушіння і кінцеве, відповідно.

На основі матеріального і енергетичного балансів математичної моделі процесу сушіння в зоні переміщення вологи і температури в зоні сушіння може бути представлена системою:

$$\begin{aligned} u_i &= f\left(u_{i-1}, t_i, \left(\frac{M_c}{F_p}\right)_i, V_i, \tau_i\right) \\ t_i &= f\left(t_{i-1}, t_{ibx}, t_{omp}, V_i, \tau_i, \left(\frac{M_c}{F_p}\right)_i\right) \end{aligned} \quad (1.117)$$

для  $i$ -тої зони  $t_{i-1}$ ,  $u_{i-1}$  – початкові значення  $t$  і  $u$  матеріалу.

Структура для  $u_i$  може бути прийнята на підставі рівняння кінетики, де окремі коефіцієнти повинні бути визначені експериментальним шляхом.



$$u_i = u_{i-1} \exp \left[ a_1 (t_i + a_2) \left( M_c / F_p \right)^{a_3} \cdot (V_i + a_4) \tau_i \right], \quad (1.118)$$

де  $u_i$  – вологовміст в  $i$ -тій зоні, кг;

$t_i$  – температура вхідного повітря, °С;

$\tau_i$  – час сушіння в  $i$ -тій зоні.

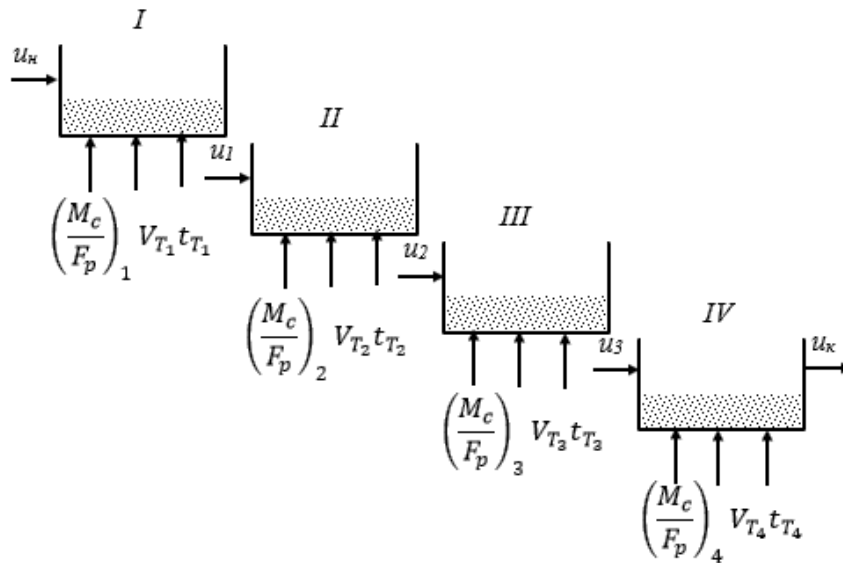


Рис. 1.27. Схема чотиризонної вібраційної сушки

Коефіцієнти  $a_1, a_2, a_3, a_4$  обчислюють за математичної обробки експериментальних даних для кожної зони сушіння.

Для проведення експериментів були визначені діапазони амплітуд і частот вібрацій віброрешітки, що забезпечують рівномірне перемішування шару гранул. Перехід на поточну вологість гранул у процесі сушіння в кожній зоні може бути виражений як визначення співвідношень залежно від температури. Рівняння теплового балансу можна використати для кожної зони (рис. 1.28):

$$W_i = \frac{u_{i-1} - u_i}{G_{i-1} - u_i} \cdot 100\%, \quad (1.119)$$

для  $W_1, u_0 = U_n$ , а  $G_0 = G_{\delta.n.}$ .

$$Q_{i.ex.} = Q_{i.usn.} + Q_{i.nazp.} + Q_{i.nom.}, \quad (1.120)$$

де  $Q_{i.usn.}$ ,  $Q_{i.nazp.}$ ,  $Q_{i.nom.}$  – тепло, витрачене на випаровування, нагрівання матеріалу і втрати в навколишнє середовище, нагрів обладнання, відповідно.

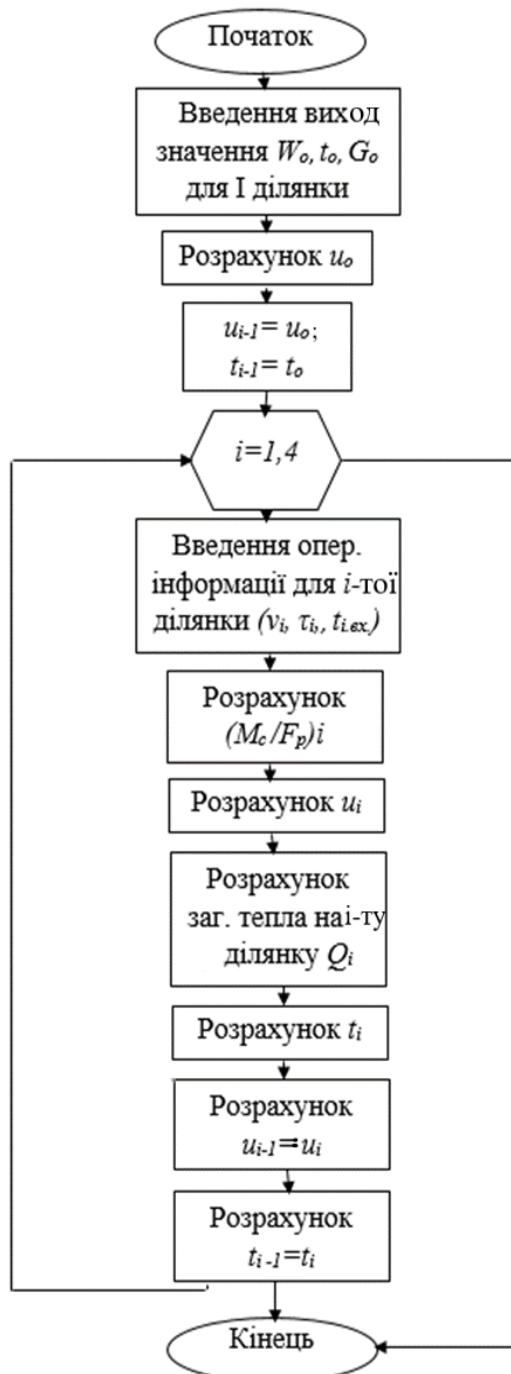


Рис. 1.28. Блок-схема алгоритму процесу сушіння гранульованої пасти у віброкиплячому шарі

## **1.5. Оцінка впливу режимів технологічного процесу на якість біологічно активних речовин**

У технологічному комплексі виробництва біологічно активних добавок із зелених рослин на якість кінцевого продукту впливає велика кількість чинників. Наприклад, час знаходження скошеної сировини до переробки; умови переробки продуктів зеленої маси в технологічних потоках; характер впливів і ступінь окиснення робочими органами машин; санітарний стан продукції (рівень бактеріального обсіменіння, канцерогенності та ін.) на кожному агрегаті; режими теплової обробки кормових матеріалів.

Умови теплової обробки продуктів істотно впливають на їх якість, яка залежить не тільки від температури і швидкості впливу, а й від залишкового вмісту фенолів і вуглеводів в оброблюваному матеріалі (Филоненко и др., 1971; Томашевский, Жданова, 2003).

З огляду на кінетику утворення комплексів білок–вуглець–фенол очевидно, що вплив теплової дії на продукти переробки має визначатися на основі комплексного вивчення ряду біохімічних показників продуктів, отриманих за різних умов.

Такі показники, як уміст у білку незамінних амінокислот та їх доступність визначають його поживну цінність. Істотним чинником, що свідчить про якість білка є атакування його ферментами шлунково-кишкового тракту, оскільки кореляція між амінокислотним складом білка і його біологічною цінністю має місце лише за умови достатньої швидкості перетравлюваності білків травними ферментами.

Із практики використання кормів у тваринництві відомо, що низький рівень перетравності сухої речовини раціону менше споживається тваринами, особливо високопродуктивними (Стабников и др., 1985). Для молочної худоби необхідні раціони, що містять корми з перетравністю сухої речовини не нижче 65 %. Крім того, головним показником повноцінності кормових раціонів є їх збалансованість з найважливішими поживними речовинами. Звідси і пред'яв-

ляються високі вимоги до промислових технологій, обладнання та організації робіт у кормовиробництві, щоб отримати корми з великою кількістю обмінної енергії.

Кількість обмінної енергії в кормі можна визначити за рівняннями регресії. Наприклад:

*для свиней:*

$$OE = 20,85\text{пП} + 36,63\text{пЖ} + 14,27\text{пК} + 16,95\text{пБЕВ};$$

*для птиці:*

$$OE = 17,84\text{пП} + 39,78\text{пЖ} + 17,71\text{пК} + 17,71\text{пБЕВ};$$

*для великої рогатої худоби:*

$$OE = 17,6\text{пП} + 31,23\text{пЖ} + 13,63\text{пК} + 14,78\text{пБЕВ},$$

де ПП – протеїн, що перетравлюється, г;

ПЖ – жир, що перетравлюється, г;

ПК – клітковина, що перетравлюється;

БЕВ – переварювані безазотисті екстрактивні речовини.

Однак дані хімічного аналізу і розрахунок загальної кількості обмінної енергії в кормі не можуть повною мірою надати достовірну інформацію про його якість. Проведений кормовий продукт у нашому випадку біологічно активних добавок і субпродукти технології можуть мати як високу, так і низьку засвоюваність організмом тварини. Ця умова і є основним якісним критерієм корму, що враховує вплив технологічних режимів виробництва на його якісні показники. Необхідний вибір таких режимів у процесах технології, які в кожному конкретному процесі і на завершальному етапі всього технологічного ланцюжка гарантували б, наряду з високими біохімічними показниками (амінокислоти, вітаміни та ін.), і високий ступінь засвоюваності кормів.

Найважливішими компонентами в кормі є протеїн, жири, клітковина, вітаміни, каротин, тому вплив технологічних режимів виробництва на якість кормів необхідно оцінити за ступенем засвоюваності організмом тваринного протеїну і вітамінів.

Загальну біологічну цінність БАД можна визначити розрахунковим мето-

дом за величиною коефіцієнта ефективності білка (*protein efficiency ratio* – *PER*), що встановлюється по зміні ваги тіла піддослідних тварин. *PER* ураховує відношення приросту тварин до кількості нативного білка при годуванні стандартизованих тварин стандартизованими раціонами.

Розрахунковий метод визначення показника *PER*, що використовує вміст незамінних амінокислот у білку і таку важливу характеристику, як його перетравність *in vitro* (Новиков и др., 1988; Kalyna et al., 2020), називається *C-PER* (*computed PER*), що враховує перетравлення досліджуваного білка і казеїну, вміст незамінних амінокислот і скор кожної незамінної амінокислоти в досліджуваному білку і казеїн. Розрахунок *C-PER* здійснюється за рівнянням:

$$z = (SPC) \cdot 2,94 \cdot \frac{2,5}{2,94} \quad (1.121)$$

$$C - PER = -2,1074 + 2,8525 \cdot z - 0,4030z^2$$

Вельми цікавим видається метод кваліметрії, тобто визначення якісних характеристик продуктів оцінюється сукупністю властивостей, з яких складається той чи інший продукт. Метод включає вагові співвідношення властивостей продукта. Запропонована в роботі математична модель за кваліметрічним методом має вигляд:

$$K = M_a \sum_{i=1}^{i=l} m_{ai} K_{ai} + M_b \sum_{i=l+1}^{i=p} m_{bi} K_{bi} + M_c \sum_{i=p+1}^{i=q} m_{ci} K_{ci} + M_d \sum_{i=q+1}^{i=n} m_{di} K_{di} , \quad (1.122)$$

де  $n$  – властивості, які характеризують якість продуктів;

$M_a, M_b, M_c, M_d$  – відносна вагомість кожної групи властивостей, які характеризують якість;

$$M_a + M_b + M_c + M_d = 1 \quad (1.123)$$

$m_{ai}, m_{ei}, m_{ci}, m_{di}$  – відносна вагомість кожної  $i$ -тої властивості для кожної групи властивості.

$$\sum_{i=1}^l m_{ai} = 1; \sum_{i=l+1}^p m_{ei} = 1; \sum_{i=p+1}^q m_{ci} = 1; \sum_{i=q+1}^n m_{di} = 1. \quad (1.124)$$

Метод кваліметрії пов'язаний з експериментальними методами оцінки величин  $M$  і  $m$ , що пов'язано зі значним ступенем суб'єктивності.

Підкреслимо, що розглянуті методи, в тому числі і показник  $C$ - $PER$ , не враховують деяких важливих особливостей кінетики гідролізу білка ферментами, а також розчинність концентратів.

Сумарний розрахунковий показник якості протеїнових кормів доцільно описати рівнянням:

$$Q_{ПЗК} = \left( m_1 \frac{C - PER_{обр.}}{C - PER_{эм.}} + m_2 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{V_n^{обр.}}{V_n^{эм.}} \right) \Phi, \quad (1.125)$$

У рівнянні (1.126) параметром  $V$  враховується вітамінна частина корму:

$$V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{n_{обр.}}{n_{эм.}}, \quad (1.126)$$

де  $n_{обр.}$  та  $n_{эм.}$  – сума вітамінів у зразку і в ідеалі, відповідно;

$\Phi$  – фактор, що враховує в рівнянні санітарно-гігієнічні показники корму;

$$\Phi = \prod_{i=1}^z \varphi_i, \text{ де } \varphi_i \begin{cases} 0 \text{ при концентрації ПДК}^* < \delta \\ 1 \text{ при концентрації ПДК} \geq \delta \end{cases}$$

$Z$  – кількість прийнятих критеріїв нешкідливості;

\*ПДК – межа допустимої концентрації;

$C-PER_{обр.}$ ,  $C-PER_{зм.}$  – розрахунковий показник, що враховує перетравлюваність білка в кормі, вміст незамінних амінокислот, відповідно в досліджуваному зразку і стандарті (як еталон взяти максимально можливі дані за шкалою ФАО / ВООЗ);

$V_n^{обр.}$ ,  $V_n^{зм.}$  – уміст вітамінів у зразку і стандарті;

$m_1$ ,  $m_2$  – коефіцієнти вагомості.

Гідроліз протеїну в організмі тварини можна описати таким рівнянням:

$$p = a + b(1 - \exp^{-ct}), \quad (1.127)$$

де  $p$  – кількість гідролізованого матеріалу в певний період часу ( $t$ );

$a$ ,  $b$ ,  $c$  – константа в експоненційному рівнянні; константа  $a$  – являє швидк засвоювану фракцію;

$c$  – константа швидкості гідролізу фракції за одну годину;

$b$  – кількість матеріалу, який гідролізується в певний період часу.

Оскільки критерієм оцінки режимів виробництва всіх процесів технологічної системи є якість виробленого продукту, то необхідно знати динаміку розпаду протеїнового концентрату, яку потрібно отримати експериментально. У цьому випадку динаміка швидкості гідролізу концентрату, виробленого за різних технологічних режимах, дасть можливість оцінити вплив температурних режимів на засвоюваність білків організмом тварин.

Водночас, швидкість засвоєння, як уже наголошувалося, є важливим показником, який визначає можливу квоту заміщення рослинними білками білків тваринного походження в раціонах годування тварин. З урахуванням визначення доступності амінокислот ( $N_i$ ) атакується ферментами, наприклад, пепсином і трипсином, кількість засвоєного білка  $S^o_{(tk)}$  за час  $t_k$  може бути описано за певною формулою:

$$S_{(t_k)}^{\circ} = \min_{1 \leq n \leq 8} \left( \frac{A_n}{F_n} \right) K_1 \cdot K_2 \sum_{i=1}^{20} \frac{A_i N_i}{100} \int_0^{t_k} [1 - \exp\{-\alpha_i(\tau - \tau_i)\}] \cdot d\tau, \quad (1.128)$$

де  $K_1$  – уміст білка в концентраті;

$K_2$  – перетравлюваність білка;

$A_n$  – уміст незамінної амінокислоти за шкалою ФАО / ВООЗ;

$A_i$  – вміст амінокислот;

$\alpha_i$  – характеристичний час;

$\tau$  – час;

$t_i$  – час появи даної амінокислоти в гідролізаті.

Однак запропоноване рівняння не враховує вітамінної частини корму, кінетику розчинності білків і залежність від температури обробки. Ці параметри враховуються в узагальненому показнику якості  $K$ , величина якого буде змінюватися і залежати від динаміки розпаду, зміни амінокислотної композиції. Все це буде характеризувати режими, за яких виробляється корм.

Тому з урахуванням вітамінної частини продукту, впливу температурних параметрів процесу на кінцевий продукт якість виробленого корму можна описати системою рівнянь:

$$\begin{cases} K = [m_1 S(T, \tau) + m_2 V(T, r)] \varphi \\ S(T, \tau) = S^{\circ} \exp(-\lambda_1(T) \tau) \\ V(T, \tau) = V^{\circ} \exp(-\lambda_2(T) \tau) \end{cases} \quad (1.129)$$



де  $m_1, m_2$  – чисельна вагомість амінокислотної і вітамінної частин у кормі;

$S^\circ(t_k)$  – кількість засвоєного білка, обумовлений рівнянням (2.35);

$T$  – температура;

$\tau$  – час;

$V^\circ, V(\tau)$  – кількість вітамінів у вихідному кормі і до моменту часу  $\tau$  після початку сушіння, мг на кг;

$\lambda_1(T), \lambda_2(T)$  – показники, що характеризують розпад протеїну і вітамінів за певної температури.

Температурна залежність постійної сталої розпаду  $\lambda_1(T)$  та  $\lambda_2(T)$  у найпростішому випадку визначається законом Арреніуса:

$$\begin{aligned}\lambda_1(T) &= \lambda_1^\circ \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \\ \lambda_2(T) &= \lambda_2^\circ \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)\end{aligned}\tag{1.130}$$

де  $E$  – енергія активації, різна, 600 Дж/моль;

$R$  – універсальна газова стала, дорівнює 8,314 Дж/(К моль);

$T$  – температура, °К.

Швидкість ізотермічної денатурації може бути описана рівнянням

$$\frac{dx}{d\tau} = -K''(1-x),\tag{1.131}$$

де  $x$  – ступінь денатурації корму, розрахований за зміною розчинності;

$K''$  – константа швидкості денатурації.

Запропонований метод оцінки якості вироблених кормів із зелених рослин, люцерни та амаранту, на технологічному комплексі дозволяє прогнозувати вплив теплової дії (нагрів маси на сировинному майданчику, режими коагуляції

і сушіння кормів, (інша теплова дія) на зміну вмісту білка, вітамінів, біологічно активних речовин у кінцевому продукті і на показники ефективності їх засвоюваності організмом тварини.

## **1.6. Екструдювання зернових сумішей зелених кормів та сої**

### **1.6.1. Загальна характеристика виробництва зернових і зернорослинних екструдатів**

З метою поліпшення виробництва якісних кормів на основі їх промислового виробництва розглянемо інноваційні рішення переробки зелених рослин методом екструдювання, які професійно представлені авторським колективом у роботі «Технологии и оборудование для экструдирования растительного сырья» (Пахамов та ін., 2018). З позицій переробки рослинної сировини запропонована технологія на перший погляд виглядає як альтернативна, однак у технології виробництва біологічно активних добавок чітко відбувається розділення клітковини і соку, а також його похідного продукту – пастоподібної концентрованої біологічно-активної добавки. В запропонованому методі ці фракції не розділяються. Під дією температур у процесі екструдювання сік коагулює в біологічно активну добавку, протеїни всередині клітчатки і в кінцевому варіанті являють собою суміш, що не відповідає вимогам споживати БАД однокамерним тваринам та птиці, а клітковину – жуйним двокамерним тваринам. Виконаємо аналіз процесів екструдювання як зернових, так і матеріалів зелених рослин.

Корми для сільськогосподарських тварин часто мають низьку поживну цінність і погано засвоюються організмом тварин. Причиною цього є недостатня якість обробки рослинної сировини, особливо фуражного зерна, що займає провідне місце в раціонах. Для підвищення поживної цінності і засвоюваності кормів у технологічний процес їх виробництва необхідно включати нові ефективні операції обробки їх компонентів.

Провідне місце серед інноваційних технологій підготовки кормової сировини займає термопластична екструзія. Екструдювання – це технологія отримання кормів шляхом протискання сировини під дією високої температури і

тиску, подальшого продавлювання через формуючий отвір екструдера. Одержуваний продукт називають екструдатом. У результаті екструзійної обробки змінюється фізична структура матеріалу. Екструдування рослинної сировини знайшло широке застосування в харчовій галузі і промислового виробництві комбікормів.

У разі екструдування зернової сировини її поживні речовини переходять в легкозасвоювану форму, що підвищує конверсію кормів. Під час екструзії за дії високої температури і тиску відбувається знищення патогенної мікрофлори, що забезпечує біологічну безпеку кормів.

Технологічна операція екструдування дозволяє ефективно обробляти і вводити до складу комбікормів нові види рослинної сировини, зокрема відходи харчової промисловості і зелену рослинну масу, що забезпечує зниження собівартості кормів і збагачення їх цінними поживними речовинами, наприклад каротином.

### **1.6.2. Загальні принципи екструдування сумішей**

Різноманітну сировину, яку під дією температури і тиску можливо перетворити на досить пластичну масу, може піддаватися екструдуванию. Отже, значна частина рослинної сировини, використовуваної в харчовій і комбікормовій промисловостях, може стати екструдованою. Встановлено, що рослинні матеріали в процесі екструзії можна розглядати як полімери біологічного походження (біополімери).

Для екструдування сировини застосовують шнекову пресувальну машину – екструдер (рис. 1.29). Він складається з приводу, завантажувальної воронки для сировини і циліндричного корпусу (матеріального циліндра), всередині якого в робочій (екструзійній) камері розташовується шнековий робочий орган. У торці корпусу розташовується головка (матриця) з фільєрою – формуючим отвором.

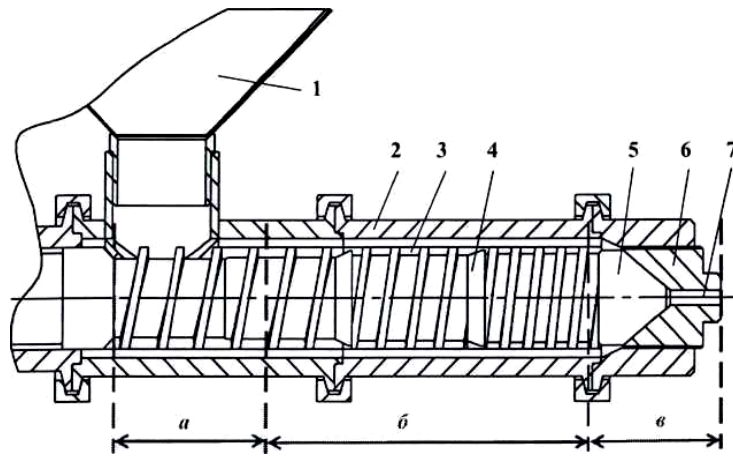


Рис. 1.29. Спрощена схема шнекового екструдера та його робочі зони

*a* – зона змішування; *б* – зона ущільнення і пластифікації матеріалу;

*в* – зона дозування (структурування);

1 – завантажувальна воронка; 2 – циліндричний корпус; 3 – робоча камера;

4 – шнек; 5 – передматрична зона; 6 – матриця (головка); 7 – фільтр

Екструдований рослинний матеріал (зазвичай в сипкому стані) через горловину завантажувальної воронки надходить у робочу (екструзивну) камеру і захоплюється витками шнека. Частинки матеріалу переміщуються в осьовому напрямку по гвинтовому каналу шнека, додатково переміщуючись, стають дрібними. Ця зона робочої камери екструдера називається зоною змішування або зоною живлення (**зона *a***, рис. 1.29). Витрата матеріалу в цій зоні залежить від діаметра шнека, глибини його нарізки і кроку, підвищуючись при їх збільшенні.

У ході переміщення під дією тиску (2 – 5 МПа), створюваного шнеком, поступово збільшується тиск біополімерного матеріалу, а під дією тертя матеріалу про витки шнека – його температура, в результаті чого починається процес пластифікації (зона ущільнення і плавлення матеріалу). Ця зона робочої камери екструдера називається зоною ущільнення і пластифікації (**зона *б***, рис. 1.29). У результаті дії матеріал перетворюється на в'язкопластичну масу. Температура рослинного матеріалу в зоні плавлення досягає 40 – 60 °С.

У зоні дозування або структурування (**зона *в***, рис. 1.29) розплавлений матеріал гомогенізується. Температура матеріалу в зоні дозування досягає 120–

150 °С. У кінці цієї зони розплав являє собою цілком гомогенну (однорідну) масу. Розплав матеріалу з передматричної камери під тиском продавлюється крізь фільтру матриці. При його виході з матриці під дією різкої зміни тиску (від 15 – 25 МПа до атмосферного) відбувається майже миттєве випаровування як вільної, так і частини зв'язаної вологи, і зміна фізичної структури рослинного матеріалу, зокрема збільшення його об'єму і пористості призводить до остаточного формування екструдата.

Схему шнекового екструдера наведено на рис. 1.30. Підвищення температури матеріалу умовно представлено графічно, як зміна його кольору, від жовтого до червоного.

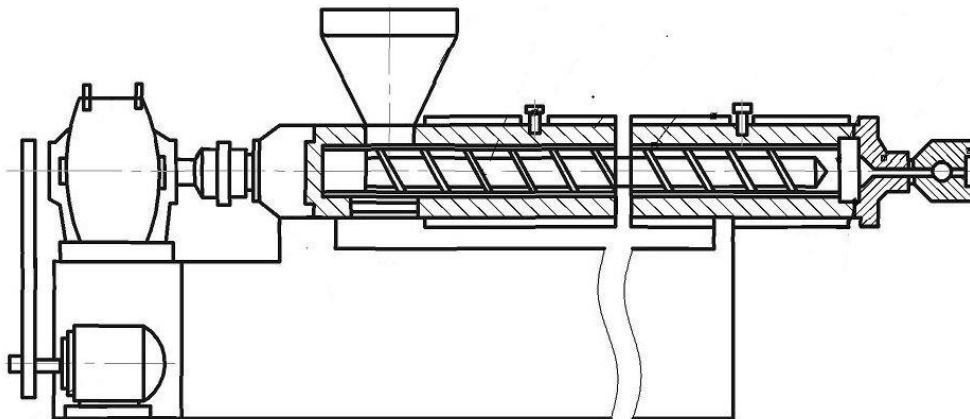


Рис. 1.30. Схема шнекового екструдера

Екструзивна обробка є короткочасною: оброблюваний матеріал перебуває в екструдері від 30 до 90 с. Під дією високої температури і тиску майже цілком знищуються патогенна мікрофлора і плісняві гриби, що містяться у вихідній сировині.

Існують три основні види пресування: холодне, тепле і гаряче.

Холодному екструзуванню може бути піддано лише рослинну сировину з високою вологістю (30 – 60 %). У його ході відбуваються зміни структури матеріалу при його повільному переміщенні під тиском і формуванні через фільтру. Підведення тепла в екструдер відсутнє.

За теплового екструдювання суху сировину зволожують водою до 20–30 % і підігривають. В екструдері суміш піддається механічному і тепловому впливу. Готовий екструдат володіє невисоким рівнем щільності, має пористу будову.

У випадку гарячого екструдювання процес здійснюється швидкоплинно, що викликає різке зростання тиску і перехід механічної енергії в теплоту. Вологість сировини становить 10–20 %. Тепло додатково потрапляє до екструдюваного матеріалу через нагрівальні елементи, а також через зовнішні стінки корпусу екструдера.

Змінюючи параметри процесу екструдювання сировини, можливо широко варіювати властивості одержаного готового продукту. Завдяки цьому екструзійні технології обробки рослинної сировини знаходять все більш широке застосування.

### **1.6.3. Характеристика рослинної сировини як об'єкта для виробництва екструдатів та екструдювання**

Із злакових культур для виробництва екструдатів в основному використовують кукурудзу, ячмінь, пшеницю, бобові, сою, горох, а також овес, жито, просо.

Ячмінь – найбільш широко використовується як зерновий корм у годуванні всіх видів сільськогосподарських тварин. Містить 86,7 % сухих речовин, у тому числі протеїну – 10,1 %, жиру – 2,2 %, клітковини – 4,0 %, золи – 2,8 %. Поживна цінність 1 кг сухого ячменю становить в середньому 1,21 кормової одиниці. Перетравність органічних речовин – близько 89 %. Об'ємна вага зерна ячменю – 480–680 кг/м<sup>3</sup>.

Зерно пшениці озимої фуражних кондицій містить 86,7–88,0 % сухої речовини, в тому числі протеїну – 12,7–16,2 %, жиру – 2,3–3,7 %, клітковини – 2,5–2,7 %, золи – 1,8 %. В 1 кг зерна пшениці міститься 1,2–1,4 кормової одиниці та 117 г перетравного протеїну. Його об'ємна вага становить 730–850 кг/м<sup>3</sup>.

Овес – дієтичний корм, який використовується в годівлі молодняку сільськогосподарських тварин. За хімічним складом овес включає 86,7 % сухих речовин, у тому числі 10,8–11,8 % протеїну, 4,7–5,6 % жиру, 9,4–9,8 % клітковини і 3,4–3,8 % золи. Перетравність органічних речовин – 70 %. Один кілограм вівса містить 1,0 кормову одиницю і 85 г перетравного протеїну. Об’ємна вага зерна вівса – 300–550 кг/м<sup>3</sup>.

Зернобобові культури – горох, вика, соя відрізняються високим умістом протеїну і низьким умістом жиру (за винятком сої). Ці культури використовуються як білкові компоненти раціонів сільськогосподарських тварин усіх видів. Вони містять у значних кількостях усі необхідні для організму тварини амінокислоти (лізин, метіонін та ін.) мінеральні речовини (кальцій, фосфор).

Горох – найбільш поширена культура з групи зернобобових, містить 85 % сухих речовин, у тому числі 22,2 % протеїну, 1,9 % жиру, 5,4 % клітковини, 2,8 % золи. В 1 кг гороху міститься 1,17 кормової одиниці, 195 г перетравного протеїну. Перетравність органічних речовин гороху становить 87 %.

Соя за своїм складом вигідно відрізняється від інших бобових культур. Зерно сої містить 85,6 % сухих речовин, у тому числі 34,5 % протеїну, 17,4 % жиру, 5,7 % клітковини та 4,6 % золи. В 1 кг сої міститься 1,38 кормової одиниці та 290 г перетравного протеїну, 5,1 г кальцію і 6,9 г фосфору. Перетравність органічних речовин – 85–87 %. Білок сої є повноцінним за вмістом амінокислот. Використовують сою для збалансування раціонів за протеїном і амінокислотами при годуванні всіх сільськогосподарських тварин.

Уся зернова сировина повинна мати сертифікати відповідності за показниками безпеки. Контроль якості вихідної сировини полягає в перевірці відповідності показників якості, зазначених у документах постачальників, їх фактичним значенням. Зернова сировина, що надходить, має відповідати показникам якості, встановленим діючими стандартами, технічними умовами. Вимоги до якості фуражного зерна представлені в табл 1.1.

Таблиця 1.1. Показники якості зернової сировини

№ п/п	Контрольований показник	Допустиме значення показника
1.	Вологість зерна	Не більше 15 %
2.	Бактеріальна забрудненість	Не більше $5 \times 10^5$ КОЕ/г
3.	Уміст мікотоксинів: Т-2 токсин афлотоксину В1 зеараленон охратоксин А дезоксиніваленон фумонізидів сума афлатоксинів В1, В2, С1, С2	Не більше, мг/кг: 0,1 0,02 1,0 0,05 1,0 5,0 0,02
4.	Металомагнітна домішка	Не більше 200 мг/кг
5.	Зараженість шкідниками	Не допускається, зараженість кліщем вище 20 екз./кг
6.	Забрудненість мертвими комахами-шкідниками	Не більше 15 екз./кг
7.	Вміст шкідливих домішок (насіння бур'янів)	Не більше 0,1 %
8.	Вміст пестицидів	Не більше 0,1 мг/кг

Важливе значення при виробництві збалансованих комбікормів для сільськогосподарських тварин мають зелені корми, зокрема, зелена маса люцерни і амарант, які є незамінним джерелом легкодоступних поживних речовин. Ці трави характеризує особливість – високий вміст вологи (від 60 до 80 %). За вмістом перетравного протеїну – вітамінів і енергетичної поживності (калорійності) – суху речовину кормових трав можна порівняти з концентрованими кормами, але перевершує їх по біологічній цінності. Рослинна маса має високий вміст необхідного для тварин каротину, що надто важливо для птахівництва.

Безпосереднє включення зеленої рослинної маси до складу комбікорму за звичайної технології його виробництва, тобто її механічне змішування з інши-



ми компонентами неефективне, оскільки з-за її високої вологості й отриманий корм матиме високу вологість, короткий термін зберігання і низьку сипкість .

Екструдування ж рослинної маси в чистому вигляді ускладнено її високою вологістю. Ефективним способом переробки і включення до складу комбікормів зеленої маси є її спільне екструдування з фуражним зерном.

При виробництві зернорослинних екструдатів використовується подрібнення лістостеблової маси зелених рослин, зокрема кормових трав, що особливо стосується багаторічної люцерни та амаранту.

Найвищу цінність, як інгредієнта зернорослинних екструдатів, представляють сіяні *багаторічні бобові трави*, забезпечуючи за рахунок багатоукісного (2 – 3 рази на сезон) використання посівів значний вихід зеленої маси з високим умістом поживних речовин і вітамінів (Долинский, Малецкая, 1968; Липкович, 1984; Новиков и др., Стабников и др., 1985).

У сухій речовині багаторічних кормових трав уміст протеїну досягає 10,2–19,3 %, жиру – 2,1–4,4 %, клітковини – 23,0–32,0 %, золи – 6,4–9,6 %. Великий в них і вміст вітамінів та інших корисних речовин, особливо каротину (150–280 мг сухої речовини). У сільгосп підприємствах основними представниками багаторічних бобових трав є люцерна, конюшина, але провідне місце серед них займає люцерна, що володіє цінною кормовою гідністю – в різних видах приготованих з неї кормів на кожну кормову одиницю припадає 100 – 220 г перетравного протеїну.

У листі і стеблах *люцерни синьогібридної* міститься, (залежно від фази вегетації) 21,0–38,0 % сухої речовини; 17,8–18,9 % протеїну; 2,3–4,4 % жиру; 23,1–30,0 % клітковини; 7,8–9,6 % золи (рис. 1.31). Перетравність органічних речовин люцерни синьогібридної жуйними тваринами становить 65–69 %. Уміст каротину в люцерні сягає 220–300 мг/кг. 1 кг рослинної маси люцерни містить 0,29–0,34 кормової одиниці (3,2–3,7 МДж обмінної енергії). У табл. 1.2 наведені результати хімічного аналізу змісту різних речовин у зеленій масі люцерни.



Рис.1.31. Люцерна

Зелена маса люцерни є рекомендованим видом сировини для виробництва зернорослинних екструдатів. Амарант належить до однорічних культур, однак зелена маса його має велику кількість білка і каротину.

Крім згаданих культур, як інгредієнтів зернорослинних екструдатів, можуть бути використані й бобово-злакові суміші, наприклад горохо-вівсяна суміш.

Оптимальна фаза укосу багаторічних бобових трав – стадія бутонізації – початок цвітіння; злакових – вихід в трубку, колосіння. Вологість рослинної маси кормових трав після скошування становить 70–80 %.

Таблиця 1.2. Хімічний склад одного кілограма зеленої маси люцерни

Показник	Уміст	Показник	Уміст
1	2	3	4
Волога, %	75 – 80	Залізо, мг	990
Каротин, мг	380	Зола, г	19,5
Протеїн, г	39,1	Цинк, мг	490
Вітамін В2, мг	3,7	Кальцій, г	7,7

1	2	3	4
Жир, г	1,7	Марганець, мг	48
Вітамін В5, мг	72	Фосфор, г	2,9
Клітковина, г	0,12	Мідь, мг	466
Жир, г	1,7	Марганець, мг	48
Вітамін В5, мг	72	Фосфор, г	2,9
Клітковина, г	0,12	Мідь, мг	466

Рослинна маса кормових трав, призначена для екструдювання повинна бути свіжоскошеною, з нормальними кольором і запахом, без видимих сторонніх включень, мати вологість 70–80 %. Перед екструдюванням рослинна маса подрібнюється на частки завдовжки 6–10 мм.

Об'ємна маса подрібненої зеленої рослинної маси, залежно від довжини різання і початкової вологості, становить від 150 до 250 кг / м<sup>3</sup>.

#### **1.6.4. Структурна схема матеріальних потоків виробництва екструдатів**

Структурні схеми переробки зернових сумішей та зерно-рослинних екструдатів, які показують послідовність процесів трансформації сировини в готові екструдовані кормові продукти, представлені на рис. 1.32, та 1.33.

#### **1.6.5. Характеристика рослинних екструдатів**

Одним з найбільш ефективних способів теплової обробки фуражного зерна перед згодовуванням тваринам є екструдювання. В його основі лежать такі процеси: теплова обробка зернових компонентів за високої (до 110–160 °С) температури і тиску 4–5 МПа; механічне деформування оброблюваного продукту шнеком екструдера і «вибух» розігрітого продукту (екструдату) на виході з фільтри. В результаті такої обробки в зерновому матеріалі відбуваються суттєві структурно-механічні та хімічні зміни, а на виході – пористий, спучений стренг

(джгут) діаметром 20–30 мм і об'ємною масою 290–320 кг/м<sup>3</sup> (Пахомов и др., 2018).



Рис.1.32. Схема матеріальних потоків виробництва зернового екструдату

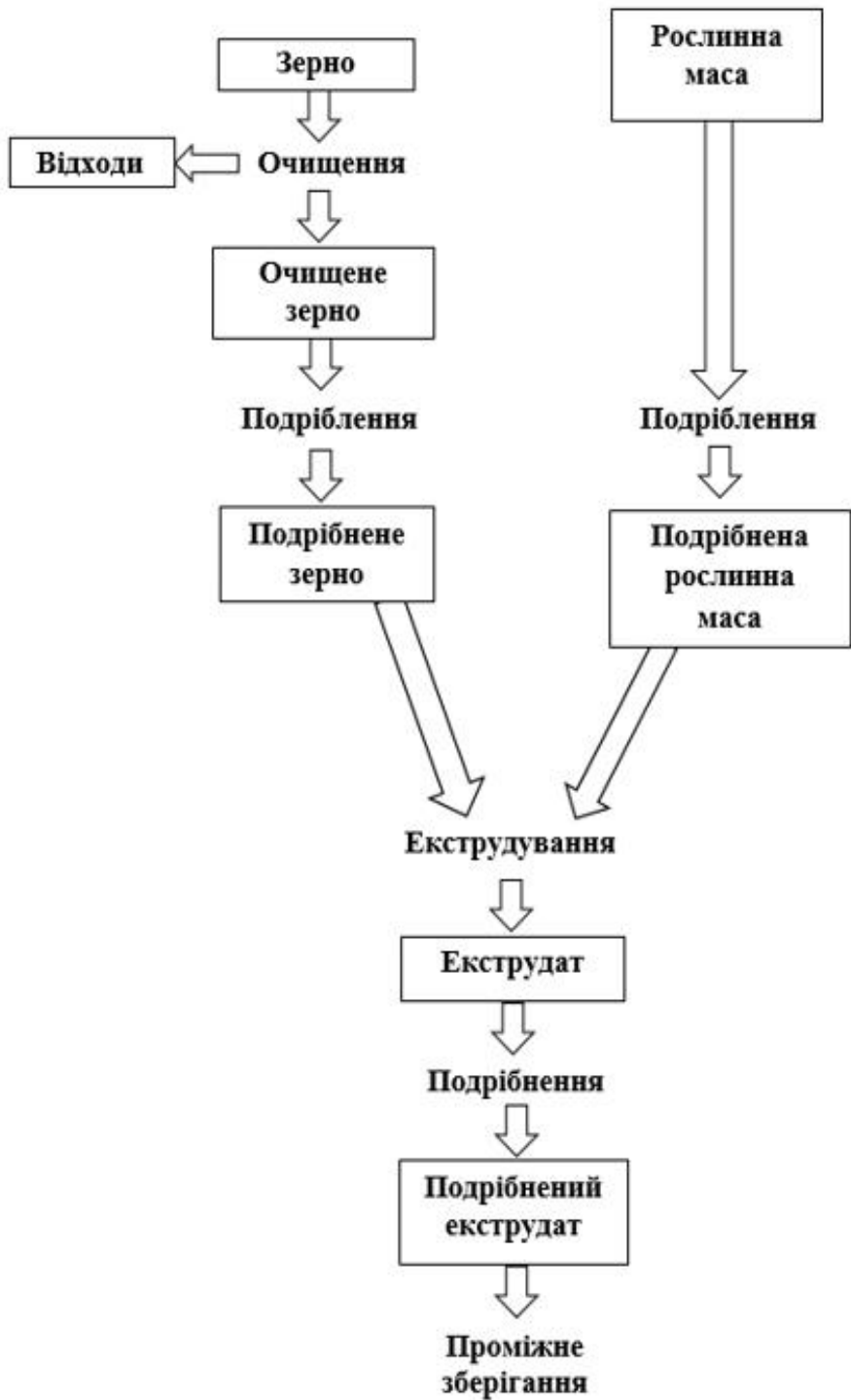


Рис.1.33. Схема матеріальних потоків виробництва зернорослинного екструдату

У процесі екструдуння зерна відбуваються глибокі зміни в структурі поживних речовин, що позитивно впливає на його енергетичну цінність і смакові якості корму:

- крохмаль желатинізується, підвищується його засвоюваність;
- підвищується перетравність білків і доступність амінокислот унаслідок руйнування вторинних зв'язків у молекулах білка;
- завдяки короткочасності процесу здебільшого зберігаються і містяться в злаках амінокислоти і вітаміни;
- підвищується енергетична цінність корму внаслідок розриву стінок жирових клітин, зростає стабільність жирів;
- підвищується перетравність клітковини внаслідок стирання і подрібнення її в процесі екструзії;
- знищується патогенна мікрофлора;
- поліпшуються смакові якості готового продукту внаслідок розпаду крохмалю на прості цукри, створення ароматичних речовин, усунення специфічного запаху, характерного для деяких культур, формування однорідної пористої структури продукту, більш доступного для впливу ферментів у травній системі тварин.

Внаслідок інтенсивної обробки в екструдері змінюється вуглеводний склад зернових культур – в екструдати в 1,6–3,2 рази знижується вміст крохмалю, в 1,5–6,2 рази збільшується вміст декстринів, в 1,2–2,1 рази зростає вміст цукрів (табл. 1.3).

Екструдати зернових культур характеризуються високим вмістом обмінної енергії, сирого протеїну і жиру.

Екструдат кукурудзи має вельми високий вміст загальної енергії і низький вміст клітковини. Він є надійним джерелом метіоніну і незамінних жирних кислот. Один кілограм екструдату з кукурудзи містить 1,41 кормової одиниці, 14,5 МДж обмінної енергії, 42 г сирого протеїну, 42 г сирого жиру, 2,7 г лізину.

Таблиця 1.3. Вміст поживних речовин у зернових екструдатах

Продукт	Вміст корисних речовин у перерахунку на суху речовину, %		
	цукор	крохмаль	декстрин
Пшениця натуральна	5,3	46,5	4,9
Екструдат пшениці	10,9	18,2	21,9
Ячмінь натуральний	5,6	50,5	6,4
Екструдат ячменю	9,6	11,8	39,9

*Екструдат ячменю* характеризується добрими смаковими якостями і високими показниками перетравності поживних речовин. Один кілограм екструдату з ячменю містить 1,24 кормової одиниці, 13,6 МДж обмінної енергії, 114 г сирого протеїну, 23 г сирого жиру, 4,2 г лізину.

*Екструдат пшениці* – високоцінний енергетичний компонент кормів з низьким умістом клітковини, що перевершує кукурудзу за вмістом протеїну. 1 кг екструдату з пшениці включає 1,35 кормової одиниці, 14,2 МДж обмінної енергії, 127 г сирого протеїну, 30 г сирого жиру, 4,7 г лізину.

*Екструдат гороху* – високопротеїновий продукт з добрим набором амінокислот і легкодоступних вуглеводів, володіє високими смаковими якостями. Може слугувати основним джерелом білка в комбікормах для поросят. Рівень введення в рецептуру комбікорму – 10–30 %. 1 кг корму містить 1,24 кормової одиниці, 13,7 МДж обмінної енергії, 220 г сирого протеїну, 16 г сирого жиру, 15,5 г лізину.

*Екструдат сої* – цінний білковий та енергетичний компонент комбікормі для сільськогосподарських тварин, особливо для свиней, з чудовим балансом амінокислот і незамінних жирних кислот. Рівень введення в рецептуру комбікормів – до 10–30 %. В 1 кг корму міститься 1,46 кормової одиниці, 15,2 МДж обмінної енергії, 360–380 г сирого протеїну, 80 г сирого жиру, 29 г лізину.

При згодовуванні зернових екструдатів сільськогосподарським тваринам на 8–12 % знижується споживання корму і на 10–40 % підвищується його засвоюваність. Продуктивність тварин зростає на 12–20 %.

Зерновий екструдат на виході з екструдера є продукт у вигляді частинок джгута (стренга) жовтого кольору довжиною 30–35 мм і шириною 10–12 мм, що має спучену пористу структуру (рис. 1.34).

Готовий зерновий екструдат являє собою подрібнений продукт пористої структури жовтого кольору, без цвілевого та іншого стороннього запаху, з розміром частинок 1,0–1,2 мм, без видимих включень цілих або роздроблених зерен.



*a*

*б*

Рис.1.34. Рослинні екструдати:

*a* – зернорослинний екструдат; *б* – зерновий екструдат

Об’ємна маса зернового екструдату становить 300–320 кг/м<sup>3</sup> (після подрібнення – 430–450 кг /м<sup>3</sup>). Щільність зернового екструдату (подрібненого) – 0,5–0,53 г/см<sup>3</sup>, крихкість – 6,0 %, індекс розширення – 2,0–2,1, сипкість – 14–15 см/с, вологість – 10–12 %, кут природного укусу – 40 °, індекс розширення – 2,0–2,1.

Здатність продукту в процесі екструзії втрачати до 50 % первинної вологості створює можливість включення до складу комбікорму зелених кормових трав без їх попереднього сушіння.



У рецептурі зернорослинних екструдатів 70–90 % становлять зернові компоненти та 10–30 % – подрібнена до розміру не більше 10 мм рослинна маса бобових і злакових трав. В 1 кг такого корму міститься (в перерахунку на суху речовину) 10,42–10,46 МДж обмінної енергії, 140–148 г сирого протеїну, 40,0–41,0 г сирої клітковини і 20–32 мг каротину.

Кінцева вологість готового зернорослинного екструдату – 9,8–15,1 %, що не вимагає додаткових витрат на досушування продукту. Значення коефіцієнта варіації розподілу сипких компонентів за масою екструдату коливаються в інтервалі 1,0–7,4 %, трав'яне різання – в інтервалі 3,0–8,0 %. Втрати каротину в процесі екструдування зеленої маси не перевищують 7–10 %. Порівняно зі звичайним розсипним комбікормом кількість декстринів в екструдати збільшується на 30 %, а ступінь клейстеризації крохмалю – в середньому на 50 %.

Зернорослинний екструдат на виході з екструдера є продуктам у вигляді частинок форми джгута (стренга) жовто-зеленого кольору довжиною 30–40 мм і шириною 10–15 мм, що має спучену пористу структуру (рис. 1.34, *a*).

Готовий зернорослинний екструдат є подрібнений продукт пористої структури жовто-зеленого кольору, без цвілевого та інших сторонніх запахів, з розміром частинок 1,0–1,2 мм, без включень цілих або роздроблених зерен.

Об'ємна маса зернорослинного екструдату становить 290–300 кг/м<sup>3</sup> (після подрібнення 400–430 кг/м<sup>3</sup>). Щільність зернорослинного екструдату (подрібненого) – 0,44–0,49 г/см<sup>3</sup>, крихкість – 7,0 %, індекс розширення – 1,8–2,0, сипкість – 13–14 см/с, вологість – 14–15 %, кут природного укосу – 42 °.

При виробництві необхідно здійснювати контроль за якістю розподілу зернової і рослинної сировини в зернорослинному екструдаті, охолодження та подрібнення продуктів.

Готовий зерновий або зернорослинний екструдат являє собою подрібнений продукт пористої структури жовтого або жовто-зеленого кольору, без цвілі та іншого стороннього запаху, з розміром частинок 1,0–1,2 мм, без видимих включень цілих або роздроблених зерен.

Уміст каротину в зернорослинному екструдаті в процесі екструдувannya не має знижуватися більш ніж на 10 % порівняно з його вмістом у вихідній сировині ( з урахуванням відсоткового вмісту рослинної маси в екструдаті).

Таблиця 1.4. Показники якості готових рослинних екструдатів

№	Контрольований показник	Допустиме значення показника
1.	Розмір частинок подрібненого екструдату (крупки)	1–1,2 мм
2.	Вміст каротину в зернорослинному екструдаті	Не менше 20 мг/кг
3.	Вологість екструдату: зернового зернорослинного	10–12 % 14–15 %
4.	Об'ємна маса екструдата: неподрібненого зернового подрібненого зернового неподрібненого зернорослинного подрібненого зернорослинного	300 – 320 кг/м <sup>3</sup> ; 430 – 450 кг/м <sup>3</sup> ; 290 – 300 кг/м <sup>3</sup> ; 400 – 430 кг/м <sup>3</sup>
5.	Бактеріальна забрудненість	Не більше 5 × 10 <sup>5</sup> КОЕ/г
6.	Вміст мікотоксинів: Т-2 токсин афлотоксин В1 зеараленон охратоксин А дезоксиніваленон фумонізін сума афлатоксинів В1, В2, С1, С2	Не більше 0,1; 0,02; 1,0; 0,05; 1,05; 0,02 мг/кг
7.	Металомагнітна домішка	Не більше 200 мг/кг
8.	Ступінь декстринізації зерна після екструдувannya	Не менше 40 %
9.	Крихкість екструдата: зернового зернорослинного	6 % 7 %

## **1.7. Опис технологічного процесу виробництва екструдатів**

### **1.7.1. Виробництво зернорослинних екструдатів з біологічно активними добавками**

Зернорослинний екструдат проводиться методом «холодної» екструзії подрібнених фуражного зерна і зеленої рослинної маси (разом). Спосіб виробництва зернорослинного екструдату захищений патентом КО 2619981.

Важливим моментом при виконанні технологічного процесу за пропонованою схемою є необхідність мінімізації втрат, протеїну, каротину та інших корисних речовин, що містяться в зеленій рослинній масі. Особливо важливо забезпечити мінімальні втрати каротину, як цінної поживної речовини, найбільш підданої руйнуванню в процесі заготівлі та приготування кормів. Для цього свіжоскошена рослинна маса якомога швидше має бути доставлена на внутрішньогосподарське підприємство та відразу піддана подрібненню, без технологічної паузи (проміжного зберігання) піддана екструдуванню.

У ході технологічного процесу виробництва зернорослинного екструдату свіжоскошена рослинна маса попередньо пропускається через електромагнітний сепаратор (рис. 1.35, поз. 1), в якому виділяють металомангі домішки. Далі маса надходить в дисковий подрібнювач (поз. 5). Подрібнена рослинна маса по гвинтовому конвеєру подається в розташований над екструдером наддозаторний бункер, поєднаний з об'ємним дозатором (поз. 6), де здійснюється її дозування. Дозована рослинна маса надходить в екструдер (поз. 7), де відбувається її спільне екструдування з фуражним зерном. Зерно попередньо пропускають через електромагнітний сепаратор (поз. 1), в якому проводиться видалення металомангітних домішок.

Далі його очищають на зерновому сепараторі (поз. 2) від неметалічних і мінеральних домішок. При використанні зерна плівчастих зернових культур (ячмінь, овес) проводять його лушення на лушильній машині.

Зерно зернобобових культур (горох, соя) після очищення в цілому вигляді транспортується шнеком у наддозаторний бункер (поз. 6) над екструдером (поз. 7).

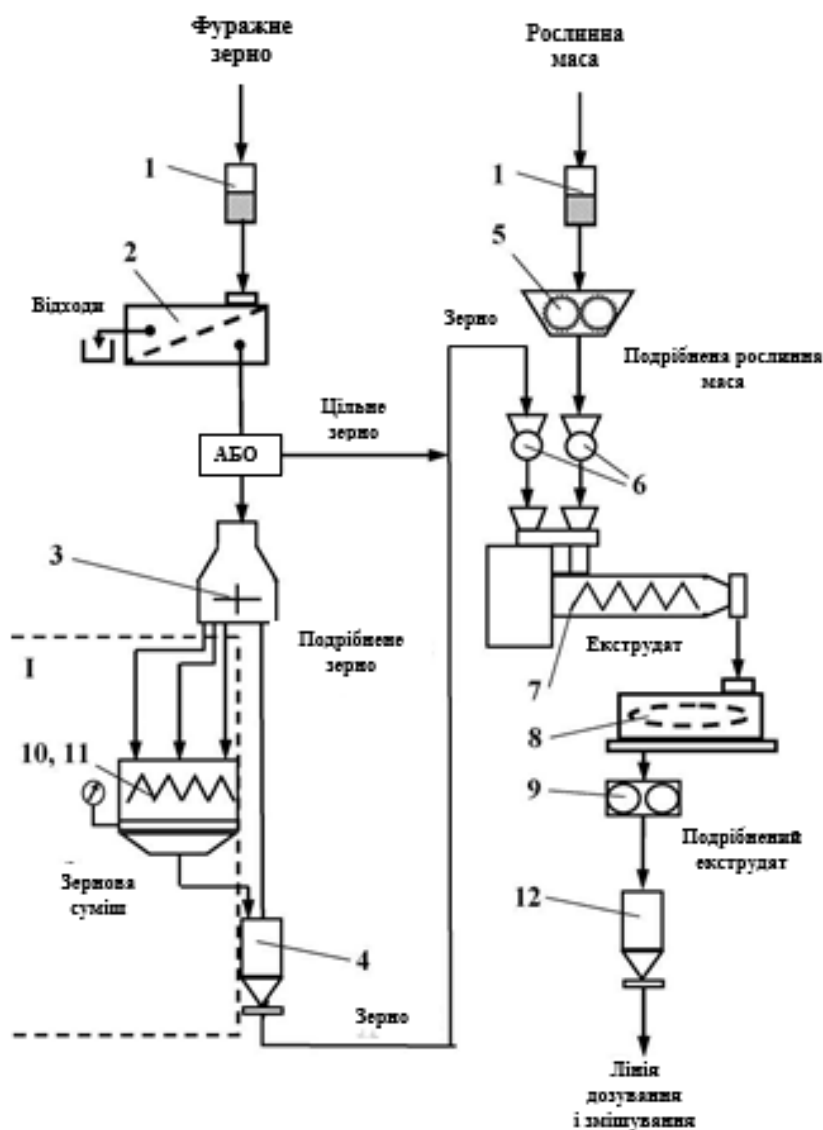


Рис. 1.35. Схема технологічного процесу виробництва зернорослинного екструдату:

- 1 – магнітний захист; 2 – сепаратор зерновий; 3 – молоткова дробарка;
- 4 – оперативна ємність; 5 – дисковий подрібнювач;
- 6 – наддозаторний бункер і об'ємний дозатор; 7 – екструдер; 8 – охолоджувач;
- 9 – подрібнювач-структуратор; 10 – змішувач; 11 – ваговий дозатор;
- I – відгалуження технологічного потоку при використанні декількох видів зерна

Фуражне зерно після очищення направляється пневмотранспортом або шнеком у молоткову дробарку з діаметром отворів сит 3 мм (поз. 3), де піддається одноступінчастому подрібненню, після чого потрапляє в оперативну ємність (поз. 4) для проміжного зберігання.

При використанні в рецепті комбікорму декількох видів фуражного зерна кожен з них після очищення по черзі подрібнюється в молотковій дробарці (поз. 3), після чого пневмотранспортом або шнеком – у змішувач періодичної дії (поз. 10), поєднаний з ваговим дозатором (поз. 11). При цьому подрібнення і завантаження певного виду зерна в змішувач здійснюється до набору необхідної рецептом маси. Подрібнення і завантаження обраного виду зерна припиняється. Потім здійснюється подрібнення і завантаження в змішувач з одночасним ваговим дозуванням нового виду зерна. Після завершення дозування і завантаження зерна в змішувач (поз. 10) здійснюється його змішування протягом 3–5 хв. Отримана зернова суміш шнеком транспортується в оперативну ємність (поз. 4) для проміжного зберігання.

Подрібнене або цільне зерно, або зернова суміш з оперативної ємності (поз. 4) по шнеку подається в розташований над екструдером наддозаторний бункер, поєднаний з об'ємним дозатором (поз. 6), де відбувається його дозування. Дозоване фуражне зерно надходить в екструдер (поз. 7), де здійснюється його спільне екструдування з рослинною масою. Зазначимо, що передчасно змішування зерна з рослинною масою не відбувається.

Одержуваний в екструдері зернорослинний екструдат подається шнеком в охолоджувач (поз. 8), де його температура знижується до температури навколишнього середовища. Охолоджений екструдат по шнеку надходить у вальцювий подрібнювач-структуратор (поз. 9) для подрібнення.

У разі використання подрібнювача, що входить до складу екструдера, одержуваний подрібнений екструдат прямує в охолоджувач (поз. 8).

Подрібнений зернорослинний екструдат шнеком транспортується в оперативну ємність (поз. 12) для проміжного зберігання.

У міру необхідності екструдат прямує в технологічну лінію для змішування з іншими компонентами комбікорму або використовується безпосередньо для годування тварин.

### 1.7.2. Основні технологічні параметри процесу виробництва екструдатів

Під час виконання технологічного процесу щодо виробництва зернових і зернорослинних екструдатів необхідно дотримуватися рекомендованих значень параметрів, наведених в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 Параметри технологічного процесу виробництва зернових та зернорослинних екструдатів

№ п п	Параметр	Одиниця виміру	Значення
1	2	3	4
1.	Розмір частинок подрібненої рослинної маси	мм	6 – 10
2.	Діаметр отворів сит молоткової дробарки при подрібненні зерна	мм	3, 0
3.	Середній розмір частинок подрібненого зерна: пшениця ячмінь кукурудза	мм	1,65 – 1,85 1,6 – 1,61,8 1,5 – 1,8 1,6 – 1,8 1,5 – 1,8
4.	Вологість фуражного зерна для виробництва екструдату	%	16–18
5.	Вихідна вологість рослинної маси	%	не більше 70
6.	Масова частка рослинної маси у вихідній сировині для виробництва зернорослинного екструдату	%	15 – 20 (не більше 30)
7.	Температура екструдату на виході з екструдера: зернового зернорослинного	°С	140–150 120–130

1	2	3	4
8.	Температура екструдату після охолодження	°С	Г° навколишнього середовища (не більше ніж на 10°С вище)
9.	Розмір частинок екструдату після подрібнення	мм	1, - 1,2
10.	Вологість екструдату: зернового зернорослинного	%	10 – 12 14 – 15
11.	Об'ємна маса екструдату: неподрібненого зернового подрібненого зернового неподрібненого зернорослинного подрібненого зернорослинного	кг/м <sup>3</sup>	300–320 430–450 290–300 400–430

### 1.7.3. Контроль якості процесу екструдувannya

Гарантувати якість виконання технологічного процесу, відповідно до розробленої схеми, дозволяє систематичний контроль його параметрів. Контроль якості виконання технологічного процесу спрямований на забезпечення виробництва зернових і зернорослинних екструдатів, що відповідають вимогам нормативних документів і споживачів. Такий контроль здійснюється виробничим персоналом та інженерно-технічними працівниками відповідно до схеми контролю якості сировини і продукції (табл. 1.6).

Виробничий персонал здійснює контроль за надходженням вихідної сировини, контроль перебігу технологічного процесу, в тому числі за очищенням сировини від бур'янів і металомагнітних домішок, за її подрібненням, дозуванням, екструдуванням, санітарним станом виробничих ділянок.

Таблиця 1.6. Види контролю виконання технологічного процесу виробництва екструдатів та їх періодичність

№ п п	Вид контролю	Періодичність	Показник правильності виконання технологічного процесу
1.	Контроль очищення сировини від металомагнітних домішок і очищення сепараторів	два рази на зміну	В очищеній сировині відсутні металомагнітні домішки
2.	Контроль очищення зерна на сепараторі	один раз на зміну	В очищеному зерні відсутні великі домішки
3.	Контроль подрібнення зерна	один раз на зміну	Відсутність неподрібнених зерен у подрібненому продукті
4.	Контроль подрібнення рослинної маси	один раз на зміну	Довжина частинок подрібненої рослинної маси у випадках становить 6–10 мм
5	Контроль змішування зернової суміші	один раз на зміну	Однорідність змішування зерна на основі органолептичної оцінки
6	Контроль зволоження зерна	один раз на дві зміни	Вологість зерна після зволоження становить 16–18 %
7	Контроль точності об'ємного і вагового дозування	один раз на зміну	Відповідність маси (об'єму) відваженої партії сировини маси (об'єму) за показниками контрольних вагів (міри об'єму) з урахуванням класу похибки
8	Контроль охолодження екструдату	один раз на зміну	Відповідність $t^{\circ}$ охолодженого екструдату $t^{\circ}$ та температура навколишнього середовища
9	Контроль подрібнення екструдату	один раз на зміну	Розмір частинок екструдата після подрібнення 1,0 – 1,2 мм
10	Контроль рівномірності розподілу зернової і рослинної сировини в зернорослинному екструдаті	один раз на зміну	Рівномірний розподіл в екструдаті зернової та рослинної сировини (на основі візуальної оцінки)



#### **1.7.4. Пропозиції щодо будови технологічних модулів екструдуювання зернових, зернорослинних і соєбобових матеріалів**

Впровадження у виробництво технологій промислового отримання біологічно активних добавок та екструдованих зернових сумішей і екструдатів зі зелених рослин люцерни та амаранту, які призначаються для стартерних кормів птахів різних вікових груп та тварин, зможе значно поліпшити якість кормів в Україні. Біологічно активні добавки для птахів не містять клітковини, багаті на вітаміни, протеїн; їх амінокислотна композиція за складом корелює з амінокислотними тваринного походження.

Виробництво розглянутих у роботі технологій можливо розповсюджувати як для великих кормопідприємств, так і для фермерських, межфермерських об'єднань.

Із такою метою пропонується реалізація технологічних модулів, які представлені на рис. 1.36.

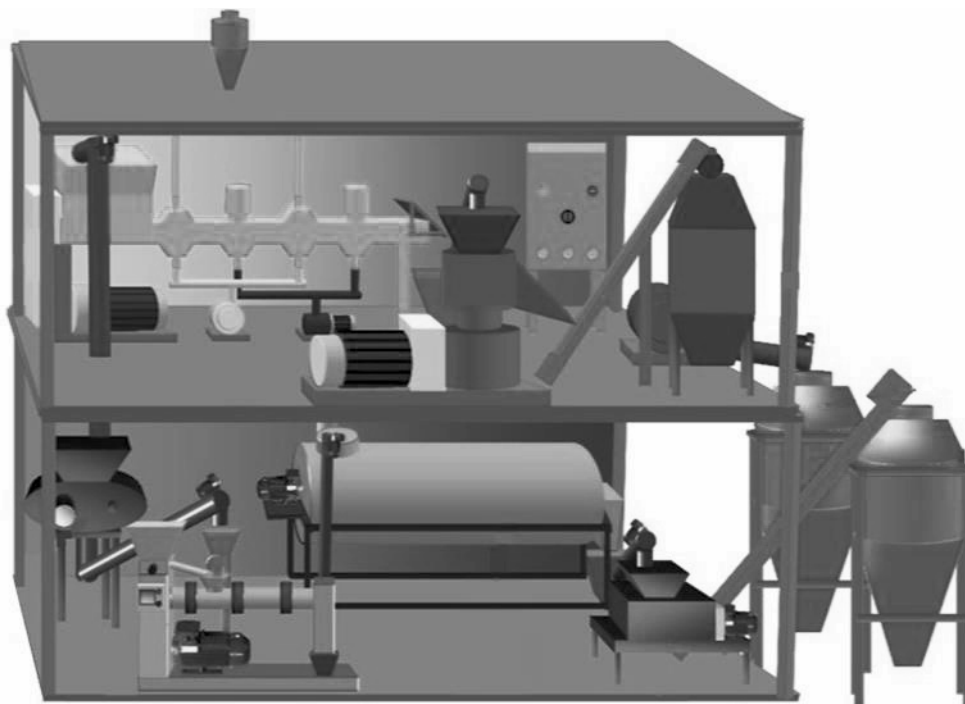


Рис. 1.36. Технологічний модуль для виробництва біологічно активних кормових добавок

Запропонований модуль включає всі необхідні механізми та обладнання (дробарка, екструдер, змішувач, центрифуга, віджимний прес, резервні ємності, транспортуючі механізми, пульт управління) і залежно від схеми виробництва виконує трансформацію технологічних потоків сировини, дотримується послідовності виконання операцій для якісного отримання кінцевої продукції.

## **1.8. Висновки**

Виконання техніко-технологічних робіт, пов'язаних з реалізацією проекту виробництва біологічно активних добавок із зелених рослин люцерни і амаранту виробництву екструдованих кормів із зелених рослин, пов'язане з покроковим виконанням певних позицій:

- 1) розробка техніко-економічного обґрунтування проекту;
- 2) отримання вихідних даних для будівництва виробничої будівлі;
- 3) дотримання схеми технологічних процесів, перелік необхідного обладнання і його технічних характеристик;
- 4) виконання технологічного регламенту виробництва біологічно активних добавок із зелених рослин та екструдатів;
- 5) характеристика якісного складу похідних кормових продуктів для птиці;
- 6) використання рекомендацій щодо застосування кормових добавок у годівлі птахів з нормами введення в раціон годівлі різних порід курей і різного віку;
- 7) впровадження результатів досліджень щодо застосування продуктів у годівлі птиці (приріст маси, якість м'яса, структура м'яса, пігментація, дослідження внутрішніх органів);
- 8) пропозиції зі створення сировинної бази люцерни та амаранту;
- 9) вихідні дані для виготовлення нестандартного обладнання;
- 10) участь в монтажі та наладці обладнання технологічних модулів;
- 11) відпрацювання режимів технологічних процесів поетапно і в комплексі з цехом по технології, що впроваджується;

12) введення технології в режим виробничої роботи з отриманням кормових продуктів згідно з регламентом;

13) навчання персоналу працювати на технологічному обладнанні з потрібними режимами роботи.

14) керування та корегування виробничого циклу отримання біологічно активних добавок і рослинних екструдатів та їх використання.

## **Розділ 2. КОНТАКТНА НЕРІВНОВАЖНА НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНА ПЛАЗМА (КНП): ОСОБЛИВОСТІ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В УМОВАХ КНП**

Плазма – це частково або повністю іонізований стан речовини, коли система містить вільні позитивні (іони) і негативні (електрони, рідше іони) заряджені частки, концентрації яких у середньому однакові (Полак, 1991). Присутність заряджених і збуджених частинок у плазмі, реакції з ними є одна з головних особливостей механізмів і кінетики плазмохімічних реакцій. Утворення і загибель частинок відбуваються в процесі збудження, дисоціації, іонізації, дезактивації і рекомбінації. Основна властивість плазми – квазінейтральність, що означає малу величину сумарного заряду плазми порівняно зі сумою зарядів одного знака. Розрізняють – повністю іонізовану плазму і частково іонізовану плазму, рівноважну і нерівноважну, високотемпературну і низькотемпературну, гарячу і холодну. В плазмі, що складається з різноманітних частинок і різної швидкості теплового руху, розрізняють температури електронів, іонів і нейтральних частинок, атомів, молекул і кластерів. Оскільки енергія теплового руху частинок значно залежить від їх маси, то в плазмі найбільше відрізняються електронна та іонна температури. Температура іонів і нейтральних частинок відрізняється мало. Ступінь різниці температур залежить від щільності цих частинок, тобто від тиску в системі. В розрядженій плазмі, коли зіткнення відбуваються рідко, тривалий час існують стани, далекі від рівноважних. У більш щільній плазмі зіткнення призводять до вирівнювання температур, тобто плазма стає рівноважною.

Суть способу утворення контактної нерівноважної низькотемпературної плазми полягає в тому, що один електрод у реакторі знаходиться в рідкій фазі, а інший, розташований на деякій відстані від поверхні розчину, призводить до нових можливостей плазмової обробки. У замкненому електричному ланцюгу проходить фарадеївський струм, тому на границі розподілу газ–рідина можуть відбуватися такі окисно-відновні процеси, здійснення яких неможливо при ви-

користанні «традиційного електролізу» або впливу на електроліт «чистої» плазми дугового, коронного, таунсендівського або бар'єрного розрядів. Процеси, що перебігають під дією контактної нерівноважної низькотемпературної плазми, умовно можна розділити на електрохімічні та плазмохімічні.

Для здійснення плазмохімічної обробки води та водних розчинів у лабораторних умовах сконструйовано експериментальну установку (рис. 2.1). Вихідна напруга надходить на підвищувальний трансформатор, з вторинної обмотки трансформатора перемінний струм подається на мостовий випрямляч, і далі вже пульсуюча напруга через баластний резистор подається на електроди реактора. Додатково до анода реактора підключений пристрій підпалу, який формує імпульси напруги амплітудою 15 кВ за тривалості до 1,5 мс. Імпульси чітко синхронізовані з фазою пульсуючої напруги. У момент формування імпульсу підпалу відбувається пробивання між електродами реактора вакуумного простору, який створюється шляхом вакуумування газової фази з реактора вакуумнасосом. Виникає різке падіння опору, в результаті якого починає протікати анодний струм, створюючи розряд. Напруга в зоні горіння розряду практично не змінюється і становить 750–900 В. Величина струму розрядного проміжку обумовлена опором плазми і значенням напруги, що прикладена до системи плазмовий розряд–баластний регулятор. Показник напруги регулюється за принципом фазового методу, тобто середнє значення фазової напруги, що подається в реактор, залежить від фази пульсуючої напруги на аноді і моменту подачі імпульсу підпалу.

Для експериментальних досліджень використовували реактори різних конструкцій (рис. 2.2). Об'єм реактора I становить  $4 \times 10^{-5} \text{ м}^3$ , діаметр  $3,4 \times 10^{-2} \text{ м}$ , висота 0,2 м (рис. 2.2,а). Для водяного охолодження використовували зовнішню оболонку. Матеріал, з якого виготовлений реактор – молібденове скло. Електрод, виготовлений з нержавіючої сталі, розташований в донній частині реактора. Рухливий електрод з тугоплавкого матеріалу розташований над поверхнею рідини, що заливається в реактор, на відстані  $(5-7) \times 10^{-3} \text{ м}$ . Відкачування газової фази проводили через патрубков, що міститься на кришці реактора. Виміри тем-

ператури розчинів проводили в реакторі II (рис. 2.2,б). Його відмінність від реактора I полягає в тому, що він має патрубки, які дозволяють знімати температурні характеристики рідкої фази системи за допомогою термометрів, а також додатковий патрубок для зливу. Для зондових вимірів використовували реактор III, включений в схему експериментального вузла (рис. 2.2,в), при цьому використано принцип сполучених посудин.

Плазма формується в момент підпалу і згасає в момент закінчення пульсацій анодної напруги. Частота повторення такого процесу дорівнює 100 Гц.

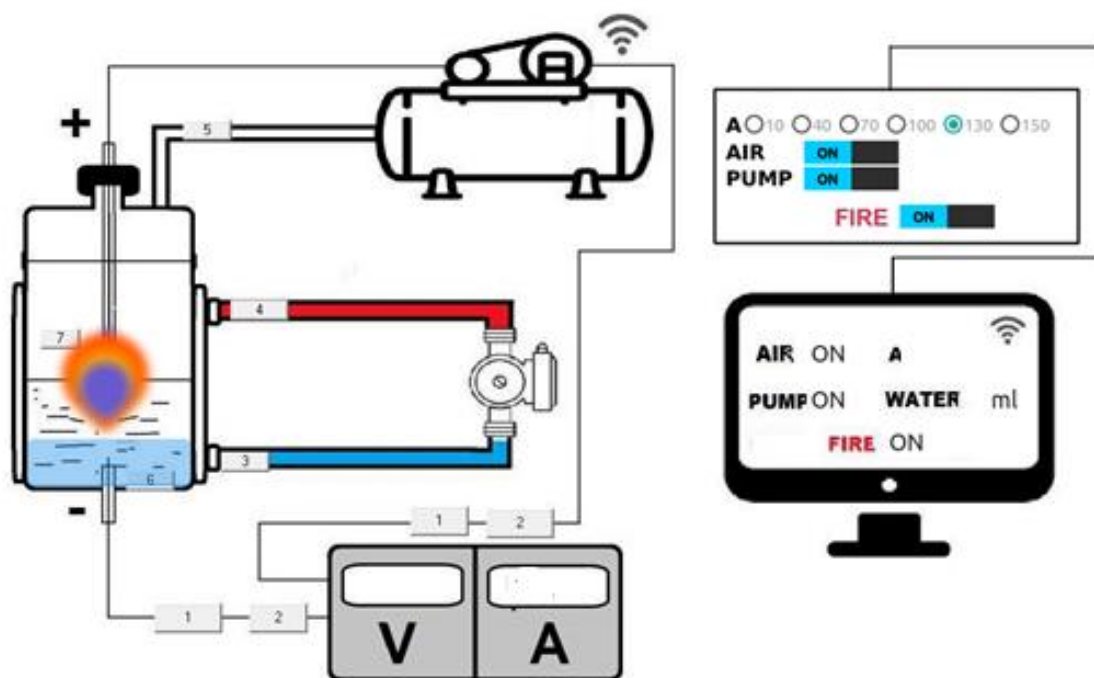


Рис. 2.1. Лабораторна установка для плазмохімічної обробки води та водних розчинів:

1, 2 – електроди і прилади вимірювання напруги та струму; 3, 4 – система охолодження реактора; 5 – вакуум-насос з лінією вакуумування; 6 – вода або водний розчин; 7 – плазмовий розряд

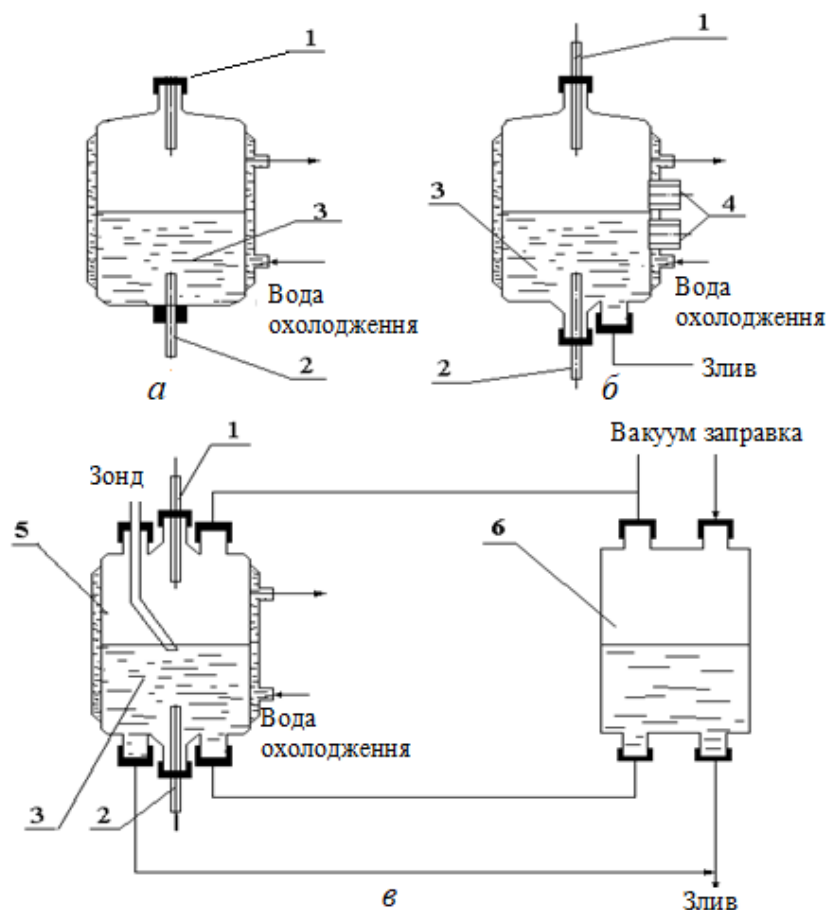


Рис. 2.2. Експериментальні реактори:

*a* – реактор I; *б* – реактор II; *в* – експериментальний вузол; 1 – анод; 2 – катод; 3 – оброблюваний розчин; 4 – патрубки; 5 – реактор III; 6 – допоміжний об’єм

Основні експлуатаційні параметри лабораторної установки наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Експлуатаційні параметри установки

Параметри	Електроживлення	Величина
Вхідна напруга	Перемінне однофазне	~50 Гц; 220 В
Вихідна напруга	Постійне, пульсуюче, регульоване в межах	700–1500 В
Струм навантаження	Максимальне значення	0,3 А
Напруга підпалу	Амплітуда	$1,2-1,5 \cdot 10^4$ В
	Тривалість імпульсу	1,0–1,5 мс

Регулювання струму розряду, що застосовується в пристрої, здійснюється зміною моменту підпалу відносно фази регулювальним пристроєм, яким у даному випадку слугує сам реактор.

## **2.1. Термодинамічний та кінетичний аналізи хімічних перетворень під дією контактної нерівноважної плазми**

Реалізація контактної нерівноважної плазми відбувається на стику хімії високих енергій і класичної електрохімії. Під «високою енергією» мається на увазі енергія, введена до системи в кількості, що перевищує необхідне для наступних найбільш енергоємних молекулярних процесів і реакцій (Манукян, Рыбкин, 2019). Ця енергія породжує в реагуючій системі специфічні умови, що викликають, у свою чергу, появу нових порівняно з традиційними, типів процесів.

Розглянуті процеси умовно можна розділити на електрохімічні (перетворення на електродах Volynets et al., 1991) і плазмохімічні (контактний вплив на рідкофазну систему ультрафіолетовим випромінюванням, іонізацією газового середовища з утворенням заряджених частинок). Основну роль при описанні таких процесів відіграє нерівноважна хімічна кінетика, для якої характерним є порушення або відсутність всіх (або частини) типових рис класичної кінетики. Завдання її полягає в тому, щоб побудувати таку теорію, яка могла б прогнозувати і створити цілісне уявлення про хімічні перетворення в подібних системах.

Чільне місце в плазмохімічних реакціях займають вільні електрони, під ударами яких у більшості випадків реакції стають визначальними в ініціюванні складних багатостадійних хімічних процесів. Їх зіткнення з частинками плазмоутворюючого газу приводять до іонізації (утворення електрона і позитивного іона); умовою стаціонарного існування плазми стає рівність швидкостей утворення і гибелі заряджених частинок. Оскільки енергія іонізації молекули перевищує енергію збудження будь-яких її внутрішніх ступенів вільності, то в плазмі одночасно відбуваються утворення обертово-, коливально- і електронно-



збуджених станів молекул, у тому числі і випромінюючих, а також їх розпад (дисоціація). Утворені під дією електронного удару частинки можуть реагувати як між собою, так і з матеріалами, що контактують із плазмою. Велике значення мають і різноманітні фізичні поля – електромагнітні, електричні, магнітні та гідродинамічні.

Хімічна реакція є одним із каналів перерозподілу енергії в системі, що доводить її в результаті до стану з мінімальною потенціальною енергією. Безперервно набираючи енергію, електрони шляхом зіткнення передають її атомам і молекулам. Однак завдяки відносно низькій ефективності цієї передачі виникає велика різниця між поступальною енергією електронів і важких частинок. Функція розподілення електронів по енергіях не є максвелівською, тобто її неможливо характеризувати таким параметром, як температура. Вона починає залежати від складу газової фази і напруженості електричного поля. Питома щільність енергії в плазмі так велика, що в ній реалізуються події, що охоплюють складний комплекс фізичних, фізико-хімічних і хімічних процесів, причому характерні часи протікання всіх процесів – близькі величини. Тому вони впливають один на одного, і для описання плазмохімічних реакцій і процесів, що протікають в умовах їх взаємодії, виникає принципово багатоканальна задача з взаємодіючими по-різному в окремі періоди часу і енергій каналами. Якщо перерахувати середню енергію електронів у відповідні теплові одиниці, то типові значення «температури» електронів складуть  $3,0 \times 10^5$ – $1,0 \times 10^6$  К. У значно нерівноважній плазмі (середня енергія електронів  $\sim 3$ – $5$  еВ, температура важких частинок  $\sim 300$ – $500$  °К) можуть спостерігатися нерівноважні фазові переходи. Для нерівноважних умов є можливість селективного направлення потоку енергії для активації потрібних компонентів хімічно реагуючої системи. Викладене справедливе для всіх нерівноважних систем: радіаційних і фотохімічних. Наприклад, енергія, що витрачається електронами на збудження різноманітних станів у плазмі кисню, є функцією приведеної напруженості електричного поля  $E/N$  ( $E$  – напруженість поля,  $N$  – сумарна концентрація частинок плазми). Величина  $E/N$  приблизно обернено пропорційна тиску. Таким чином, при ви-

соких тисках основна частина енергії витрачається на збудження коливальних станів молекули  $O_2$ , а при низьких – на збудження електронних рівнів. Така ситуація є типовою для всіх молекулярних плазмоутворюючих газів, що дозволяє реалізувати значно більш високі концентрації хімічно активних частинок, ніж спостерігалось б за такої самої газової температури в рівноважних умовах. Наприклад, у плазмі повітря й азоту при газових температурах  $\sim 300\text{--}400\text{ К}$  реалізуються такі концентрації коливально-збуджених молекул  $N_2$  основного стану, які можна досягати в умовах рівноваги при нагріванні до  $5,0 \times 10^4\text{--}1,0 \times 10^5\text{ К}$ .

У результаті численного моделювання експериментальних досліджень кінетики хімічного перетворення в тліючому розряді (Іванов и др., 1990) виявлена залежність механізму ініціювання дисоціації і конверсії вихідної речовини від зовнішніх умов розряду (хімічного складу, тиску і температури газу). Шляхом аналізу рішень дифузійно-кінетичних рівнянь для систем плазмового розряду ( $P=10\text{--}100\text{ Па}$ ) оцінені концентраційні неоднорідності, які викликані дією локалізованої реакції і утворені теоретичні моделі, що дозволяють розраховувати динаміку зміни хімічного складу суміші газів під дією плазми.

Особливості нерівноважних плазмохімічних систем характеризуються як відкриті, діючі доти, поки існує потік енергії через них. Цей факт є фундаментальною причиною їх нерівноважності з усіма наслідками. Кінетика хімічних перетворень визначається динамікою зіткнення частинок і статистикою поведінки їх ансамблів. Різниця в динаміці зіткнення частинок і властивостях взаємодіючих ансамблів у класичних системах, далеких від складу рівноваги (табл. 2.2), дозволяє виділити такі основні особливості кінетики нерівноважних процесів:

- ❖ неможливо відділити хімічну кінетику від фізичної, так як самі хімічні процеси викликають істотне відхилення системи від рівноваги;
- ❖ будь-яка плазмохімічна реакція є принципово багатоканальним процесом, що відбувається з цілим рядом збуджених станів;

❖ багатоканальність процесу зі своєю пороговою енергією каналу призводить до неможливості описання процесу в рамках уявлень про єдину енергію активації типу ареніусовської.

Таблиця 2.2. Характеристики взаємодіючих ансамблів частинок у плазмохімічній і класичній кінетиці

Характеристика взаємодіючих процесів	Класична хімічна кінетика	Плазмохімічна кінетика
Середня енергія відносного руху взаємодіючих частинок	не більше 0,1 еВ;	частіше всього, набагато більше 0,1 еВ;
Коливальне збудження реагуючих частинок	значна перевага заселення основного коливального рівня; в основному незбуджені;	велика роль високолежачих коливальних рівнів;
Стан продуктів реакцій	практично відсутні;	значна доля продуктів збудження;
Реакції заряджених частинок у газовій фазі	як правило, дуже мала;	надто істотні, інколи визначальні;
Роль взаємодій електронно-збуджених частинок	близькі;	у багатьох випадках перевага;
Співвідношення енергій поступального руху легких і важких частинок	значна перевага пружних зіткнень	істотний відрив енергії поступального руху електронів;
Співвідношення пружних і непружних зіткнень		вклад непружних зіткнень достатньо великий

У газорозрядній плазмі низького тиску механізм, що зв'язує фізичні і хімічні процеси, має свою специфіку. Нерівноважність такої плазми майже повністю визначається умовами передачі енергії від зовнішнього електромагнітного поля електронному газу, а потім – газу важких частинок. Стаціонарність стану плазми вимагає умов балансу електронів. Будь-які хімічні перетворення, впливаючи на склад газу важких частинок, змінюють умови балансу електронів

і формування їх енергетичного розподілення. Оскільки прямий зв'язок енергетичного розподілення електронів з хімічною активацією плазми достатньо очевидний, то плазму низького тиску потрібно розглядати як самоузгоджену у фізико-хімічному розумінні. Напруженість поля в плазмі та обумовлене ним енергетичне розподілення електронів необхідно встановлювати на такому рівні, щоб забезпечувалося стаціонарне існування плазми (баланс електронів), а швидкість хімічних перетворень і стаціонарний хімічний склад плазми задовольняли умовам формування цього електронного розподілення. Таким чином, зв'язок фізичних і хімічних характеристик нерівноважної плазмохімічної системи необхідно шукати, враховуючи два аспекти проблеми:

- співвідношення кінетики об'ємних хімічних перетворень і обміну енергій при зіткненнях важких частинок;
- зв'язок хімічних перетворень з умовами стаціонарного існування нерівноважної плазми (низького тиску).

## 2.2. Термодинаміка хімічних процесів

Перший аспект базується на рівнянні Паулі, що описує одночасно кінетику як фізичних, так і хімічних процесів. Воно зв'язує вірогідності знаходження системи в різноманітних квантових станах ( $P_i, P_k$ ) з віднесеними до одиниці часу ймовірностями переходів між станами ( $a_{ik}, a_{ki}$ ):

$$\frac{dP_i}{dt} = \sum (a_{ik} P_k - a_{ki} P_i) . \quad (2.1)$$

Рівняння Паулі є рівнянням балансу, в якому необхідно враховувати переходи між квантовими станами частинок, надходження частинок у цих станах у хімічні реакції, а також можливість генерації збуджених частинок під дією зовнішніх по відношенню до даної системи агентів «накачки». Якщо не враховувати переходи між квантовими станами молекул, то рівняння Паулі зводиться до звичайного рівняння хімічної кінетики.

Як уже зазначалося, високі концентрації хімічно активних частинок, включаючи заряджені частинки і фотони, характерна властивість плазмохімічних систем. Роль таких частинок велика і в інших областях хімії високих енергій: радіолізі, фотолізі, лазерній фотохімії, ударних хвилях. Однак тільки в плазмохімії властивості та існування системи надто щільно зв'язані з активними частинками. Часто сумарна швидкість плазмохімічних перетворень визначається швидкостями їх генерації і розпадання, особливо, коли йдеться про коливально- та електронно-збуджені молекули, радикали і заряджені частинки. Пряме збудження коливальних молекул електронними ударами незначне, як і передача енергії при пружних зіткненнях частинок з масами, які сильно розрізняються.

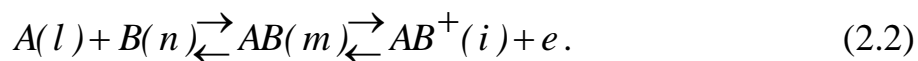
Ефективний механізм збудження полягає в прилипанні електрона до молекули з утворенням нестійкого негативного іона. Іон далі розпадається з відривом електрона, але молекула при цьому виявляється в коливально-збудженому стані. Такий процес протікає у вузькому діапазоні енергій електронів (1–2 eV), його максимальне значення  $10^{-16}$ – $10^{-15}$  см<sup>2</sup>. Важливу роль в умовах плазми відіграє коливальне збудження при зіткненнях важких частинок. У цьому випадку необхідно враховувати поступально-коливальні переходи та обмін коливальними квантами (так звані  $V-T$  і  $V-V$  процеси). Ймовірність цих процесів залежно від коливального квантового числа і температури змінюється в широких межах.

Утворення молекул в електронно-збудженому стані  $AB(Y, \nu)$  може відбуватися за однією стадією з участю молекул в основному електронному стані  $AB(X, \nu)$  (пряме збудження) або з участю уже збуджених молекул  $AB(Z, \nu)$ . Якщо  $E_{AB}(Z, \nu) < E_{AB}(Y, \nu)$ , збудження ступінчасте, при  $E_{AB}(Z, \nu) > E_{AB}(Y, \nu)$  – каскадне. Необхідна для збудження енергія передається з поступальних ступенів вільності електронів і вільних частинок. Може використовуватися також енергія коливального або електронного збудження інших молекул і енергія фотонів. У випадку атомарних газів набір можливих процесів менший із-за відсутності коливальних ступенів вільності. Вклад окремих процесів нерівнозначний і сильно розрізняється в залежності від конкретних умов у плазмовій системі. Пря-

ме збудження електронних станів електронним ударом загалом має однаковий характер для атомів і молекул. Найбільш ефективно збудження резонансних рівнів пов'язано з оптичними переходами в основному стані. Перетин збудження досягає максимуму при енергії електронів, у декілька раз перевищуючої порогову, а потім порівняно повільно спадає. При збудженні станів, не зв'язаних оптичними переходами з основним, перетин збудження трохи нижчий. При цьому максимум перетину відповідає енергіям, тільки трохи перевищуючим порогову. У подальшому перетин різко падає. Значення перетину в максимумі функції збудження, як правило, не перевищує  $10^{-16}$  см<sup>2</sup>. Але, в плазмі низького тиску такі процеси можуть повністю визначати генерацію електронно-збуджених атомів і молекул. Максимум перетину збудження електронного переходу молекули при зіткненні з іншою важкою частинкою за рахунок передачі кінетичної енергії досягається при енергіях  $10^3$ – $10^4$  еВ і приблизно в  $m_e/M_{AB}$  раз менший, ніж при збудженні електронними ударами. Тому роль подібних процесів у плазмі невелика. Однак роль переходів між внутрішніми станами частинок, що зіткнулися, суттєва. Вірогідність таких процесів велика при малій різності енергій станів внутрішньої структури частинок (при малому дефекті енергії). За мірою збільшення дефекту енергії перетин процесу монотонно падає. Якщо енергія збудження частинки більша енергії іонізації партнера, передача енергії може призвести до іонізації. Перетини і коефіцієнти швидкості перенесення енергії (гасіння збуджених станів) при зіткненнях атомів і молекул змінюються в дуже широких межах: від значень, характерних для зіткнень безструктурних частинок, до величин, близьких газодинамічним. В умовах нерівноважної плазми із широкого набору процесів, що призводять до розпаду молекул, більш ефективними є процеси, які протікають під дією електронних ударів. Дисоціація молекул може відбуватися як за рахунок збудження електронних станів молекул, так і за рахунок збудження коливальних рівнів основного електронного стану. Пряма дисоціація молекул шляхом збудження їх електронних станів ударами електронів суттєва лише в плазмі низького тиску (~100–150 Па і нижче). До розпаданню молекул призводить збудження станів відштовхування

при передаванні електронно-збудженої молекулі коливальної енергії, яка перевищує її поріг дисоціації або в результаті предисоціації.

Іонізація молекул у нерівноважній плазмі електронним ударом в основному подібна збудженню їх електронних станів. Пряма іонізація переважає в плазмі низького тиску (менше 150 Па) при малих ступенях іонізації. Зі збільшенням тиску і концентрації заряджених частинок зростає роль ступінчастої іонізації ударами електронів, а також інших процесів іонізації, що відбуваються з участю збуджених частинок. Так, у разі зіткнення збуджених важких частинок можливий процес асоціативної іонізації:



При зіткненні двох важких частинок, у даному випадку атомів  $A$  і  $B$ , у результаті утворюється молекула  $AB(m)$  у нестабільному стані, яка може розпадатися на молекулярний іон  $AB^+(i)$  і електрон. За цією ж схемою, але в оберненому напрямку протікає дисоціативна іонно-електронна рекомбінація, яка часто є основним каналом об'ємної загибелі заряджених частинок у нерівноважній плазмі. Енергія відносного руху  $\Delta E_i$  атомів  $A(l)$  і  $B(n)$ , необхідна для протікання процесу, визначається перетином потенціальних кривих іона  $AB^+(i)$  і відштовхуючого стану молекули  $AB(m)$ . Залежно від властивостей взаємодіючих частинок  $\Delta E_i$  може змінюватися в широких межах. При  $\Delta E_i = 0$  характерні значення асоціативної іонізації досягаються  $10^{-10} - 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , а дисоціативної рекомбінації –  $10^{-6} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ . Порівняння їх з теоретичними оцінками показує, що в сумарну швидкість процесу може робити вклад ряд збуджених станів молекули  $AB$ . Оскільки коефіцієнти дисоціативної рекомбінації істотно залежать від сорту іонів, швидкість об'ємної загибелі зарядів міняється з іонним складом плазми. Зокрема, зникнення молекулярних іонів зменшує швидкість рекомбінації аж до декількох порядків величини. Навпаки, утворення складних комплексних іонів прискорює дисоціативну рекомбінацію. За малих температур газу,

характерних для плазми низького тиску, процеси асоціативної іонізації і дисоціативної рекомбінації не стають детально оборотними, тобто йдуть через різні збуджені стани молекули  $AB$ .

Зіткнення електрона з молекулою може призвести до утворення негативного іона в результаті дисоціації молекули на іонну пару:

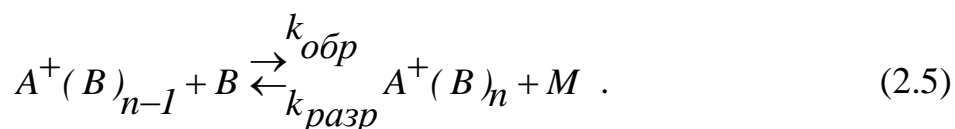


тобто в результаті прилипання електрона, частіше всього асоціативного,



Перший процес вимагає великої енергії і в умовах низькотемпературної плазми, як правило, неістотний. Другий процес може бути безпороговим або мати порогову енергію до декількох електрон-Вольт (кисень, кисневмісні гази). Його перетин має форму піків, відповідних різним збудженим станам іона  $AB^-$ . Найбільший інтерес для умов низькотемпературної плазми мають іони і нейтральні частинки в основному електронному стані. В цьому випадку порогова енергія процесу нижча за порогу дисоціації.

Складні іони, які утворено з простих іонів, а також атомів або молекул, унаслідок відштовхувальної обмінної взаємодії між ними, належать до комплексних (кластерних). Проміжний стан цих іонів між частинками з хімічним зв'язком і ван-дер-ваальсівськими молекулами призводить до того, що в плазмі ефективно протікають процеси їх синтезу і розпаду. Утворення кластерних іонів відбувається ступенево за потрібних зіткнень у процесах типу





Коефіцієнти швидкості утворення кластерних іонів змінюються в дуже широких межах ( $10^{-31}$ – $10^{-25}$  см<sup>6</sup>·с<sup>-1</sup>). До процесів руйнування кластерних іонів слід віднести їх рекомбінацію з електронами, взаємну нейтралізацію позитивних і негативних іонів, а також численні іон-молекулярні взаємодії. Характерні значення коефіцієнтів швидкостей, відповідно  $10^{-6}$ ,  $10^{-8}$  і  $10^{-10}$  см<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>. Отже, за малого ступеня іонізації більш швидким є останній процес. Результати зіставлення цих величин з коефіцієнтами швидкостей утворення кластерних іонів показують, що при не дуже низьких тисках можуть реалізуватися умови, коли розподілення кластерних іонів визначається вказаними вище ступінчастими процесами їх генерації – руйнування і близького до рівноважного. В даних умовах зміна температури газу може істотно впливати на властивості плазми і процеси, що відбуваються в ній, в результаті зміни складу комплексних іонів.

У плазмі присутні різноманітні активні частинки, які потенційно можуть реагувати з твердими тілами, полімерами або водною поверхнею. Це приводить до того, що взаємодія плазма–поверхня середовища являє собою багатоканальний і багатостадійний процес. Однак глибини проникнення всіх активних частинок у матеріал не перевищують декількох мікрометрів – табл. 2.3 (Фізика газового розряду ..., 1989).

Таблиця 2.3. Середні глибини проникнення активних частинок плазми в полімери

Активні частинки холодної плазми	Енергія, еВ	Середня глибина проникнення
Атоми, радикали, збуджені молекули	$kt \sim 0,01-0,1$ ; $E \sim 5-10$	>0,1 мкм
Іони, електрони	1–100	До 10 моношарів
Кванти ультрафіолетового випромінювання	5–20	До 10 мкм

У цілому механізм плазмохімічної дії вивчений недостатньо. Дані, наведені в літературі, часто суперечливі. Особливо ті, що стосуються процесів, які

відбуваються при формуванні плазмового розряду між електродом і поверхнею рідини, в яку занурений другий електрод. Отримано багато позитивних результатів, що знаходять застосування в різних областях науки і техніки. Однак за рахунок чого отримані ці ефекти – в основному залишається незрозумілим. Таким чином, перша проблема – це з'ясування механізмів хімічних реакцій у рідкій фазі, тобто визначення типу частинок, які реагують з поверхнею рідини, і кінетичних характеристик взаємодії. Задача ця не проста, враховуючи той факт, що всі зміни відбуваються в поверхневих шарах, і для дослідження необхідно застосовувати тонкі методи, наприклад, вторинна іонна мас-спектроскопія та ін. Друга проблема – з'ясування механізмів хімічних реакцій у газовій фазі, а саме, визначення реакцій, що контролюють потоки активних частинок на поверхню рідини. Обидві проблеми важкороздільні.

Звернемося до вже відомих праць. Перебіг розрядної енергії в системі газ–рідина супроводжується утворенням плазми над поверхнею розчину. Рух вільного електрона, утвореного в газовій фазі тим чи іншим способом у постійному електричному полі, підлягає другому закону Ньютона (Полак и др., 1991):

$$a = \frac{q}{m_0} \cdot E, \quad (2.6)$$

де  $a$  – прискорення електрона;

$q$  – заряд електрона;

$m_0$  – маса електрона;

$E$  – напруженість електричного поля.

Зіткнення електрона з молекулою можуть бути трьох типів, що призводять до іонізації молекул, до їх збудження і пружних зіткнень. Критерієм є енергія електрона. Електронно-атомні зіткнення, залежно від енергії  $K$ , повідомлені первинним електроном атома, можуть бути класифіковані таким чином:  $K > qV_i$ , де  $q$  – заряд електрона;  $V_i$  – потенціал іонізації атома. При іонізації атом перетворюється в позитивно заряджений іон із зарядом  $q^+$ ;  $-qV_i > K > 0$ . Відбувається електронне збудження атома. Через  $10^{-8}$  с збуджений атом повертається в основний стан, виділяючи поглинену енергію у вигляді фотона. Енергія

фотона, що випускається при переході атома з рівня  $E_m$  на рівень  $E_n$ , дорівнює постійній Планка. Довжина хвилі фотона визначається як

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_m - E_n}, \quad (2.7)$$

де  $c$  – швидкість світла.

Якщо  $K = 0$ , атом залишається в основному електронному стані. При цьому зіткнення залишаються пружними.

Зіткнення повільних електронів з молекулами іноді супроводжуються утворенням стабільних негативних іонів. Прикладом таких реакцій можуть бути реакції дисоціативного захвату електронів. Вважається, що ймовірність протікання їх у газових розрядах дуже велика. Дисоціація негативного іона з відщепленням електрона аналогічна процесу іонізації нейтральної частинки, яка супроводжується утворенням вільного електрона. При достатньо високій енергії іонів може відбуватися іонізація молекул при іонно-молекулярних зіткненнях. Однак, як правило, загальне число зіткнень між молекулами та електронами набагато більше, ніж між іонами і молекулами, і, як результат, роль в іонізаційних процесах іонно-молекулярних зіткнень невелика. Таким чином, іонізація молекул в електричному розряді відбувається електронним ударом. Іонізація при зіткненнях між молекулами можлива, коли кінетична енергія молекул, що зіткнулися, стає більшою за потенціал іонізації молекул, іонів і електронів. Така іонізація протікає без участі електричного або магнітного полів.

У плазмі, що створена електричним розрядом, у більшості випадків роль зіткнень між зарядженими частинками суттєво менша внаслідок того, що в нерівноважній плазмі частково іонізованого газу значно менше, ніж заряджених частинок. При рекомбінації іонів у газовій фазі енергія у вигляді фотонів, наприклад, у випадку електронно-іонної рекомбінації

$$h\nu = q \cdot V_i + K, \quad (2.8)$$

де  $h\nu$  – квант світла.

Процеси, що протікають у низькотемпературній плазмі, характеризуються нерівноважними концентраціями і різними енергіями (температурами) компонентів. У нерівноважній плазмі різниця енергій одних компонентів від інших (електронів, іонів, молекул) може досягати декількох порядків.

Вода і продукти її дисоціації, водневі і гідроксильні іони, є важливими факторами, що визначають структуру і біологічні властивості живих організмів (Zhang et.al., 2013). Міцність зв'язків між молекулами води обумовлена електричною полярністю її молекул і пояснює специфічне розташування електронів в атомах кисню і водню, що складають молекулу води. Атом кисню поєднує пару своїх електронів з електронами атомів водню шляхом перекривання  $1s$ -орбіталей атомів водню з гібридами  $sp^3$ -орбіталей атома кисню. Кожний з утворених при цьому зв'язок має на одну третину іонний і на дві третини ковалентний характер. Методами оптичної спектроскопії і рентгеноструктурного аналізу були точно визначені кути і довжини зв'язків у молекулі води. Середній кут зв'язку  $H-O-H$  становить  $104,5^\circ$ , що незначно відрізняється від величини  $109,5^\circ$  – кута, відповідного до ідеального тетраедричного розташування, чотирьох можливих  $sp^3$ -орбіталей атома кисню. Це відхилення від ідеального кута пояснюється прагненням неспарених електронів атомів кисню відштовхувати спарені електрони (середня міжатомна відстань  $H-O$  дорівнює  $0,965 \text{ \AA}$ ). Розташування електронів у молекулі води надає їй електронну асиметрію. Більш електронегативний атом кисню прагне притягнути електрони атомів водню, залишаючи водневі ядра оголеними. В результаті кожний із двох атомів водню має частковий позитивний заряд  $\sigma^+$ , а атом кисню несе частковий негативний заряд  $\sigma$ , локалізований в області неусуспільнених орбіталей. Таким чином, молекула води в цілому, хоч і не має сумарного заряду, являє собою електричний диполь. Ступінь розділення позитивного і негативного зарядів у полярних молекулах характеризується дипольним моментом, мірою якого є здатність молекули орієнтуватися в електричному полі. З огляду на величину дипольного моменту води, було розраховано, що кожний атом водню несе частковий позитивний заряд, який дорівнює приблизно  $+0,33 \times 10^{-10}$  електростатичної одиниці, атом кисню –

негативний заряд, що дорівнює приблизно  $-0,66 \times 10^{-10}$ . При плазмохімічній активації водні розчини і суміші переходять у метастабільний стан, викликаний структурно-енергетичними та електрохімічними змінами під багатофакторною дією плазмового розряду. В результаті рідкі системи протягом періоду релаксації проявляють аномальні властивості в фізико-хімічних перетвореннях. Незважаючи на велику кількість експериментальних даних, що переконливо свідчать про появу аномальних властивостей в обробленій воді, донині не існує єдиної теорії активації води, оскільки нез'ясована сама природа цього явища. Тому й теоретичне вивчення властивостей активованої води перебуває в стадії гіпотез.

У роботі (Пархоменко и др., 1991) надані реакції в рідкій фазі, індуковані низькотемпературною плазмою за понижених тисків. При цьому обговорювалися різні розташування електродів: анод у рідкій фазі; анод і катод у газовій фазі (для реалізації цієї схеми необхідно утворити умови, за яких опір між електродами повинен бути більше опору між катодним електродом і оброблюваною поверхнею); анод розміщується в газовій фазі, а катод – у розчині. Останнє є найбільш перспективним, так як відсутнє розчинення матеріалу анода. Головною особливістю розглянутих систем є поява границі розділення фаз між плазмою і рідким розчином електроліту, що призводить до виникнення нових факторів, пов'язаних з процесами перенесення зарядів. У дослідженні (Черняк, 2005) показано, що простір поблизу межі розділу фаз розчин – газ має властивості, аналогічні катодному простору при реалізації процесів класичного тліючого розряду, і вони ж відіграють роль анода в рідкій фазі. На підставі даного спостереження зроблений висновок про існування біполярного електрода, яким є рідина. На відміну від твердого електрода, з поверхні якого заряджені частинки вибивають електрони, у випадку рідкого електрода заряджені частинки проникають у розчин, взаємодіючи з ним, ініціюючи різні хімічні реакції, внаслідок яких відбувається виділення електронів у газову фазу. При цьому лімітуючими є не процеси, що протікають у газовій фазі, а концентрації електропровідних частинок, які знаходяться в рідкій фазі. Іони, які індуковані з плазми в розчин, рекомбінують з утворенням хімічно активних частинок або накопичуються в

розчині, змінюючи його електропровідність та інші властивості. При вивченні процесів, що відбуваються при електроімпульсній обробці води, був зроблений висновок про існування залежності величини частки об'ємів з упорядкованим розташуванням молекул від енергії електричного імпульсу. Співвідношення між каналами взаємодій істотно залежить від характеристик сольватації перейдених із плазми іонів. Крім того, на межі розділення фаз виникає стрибок потенціалу. За даними різних досліджень величина стрибка не є постійною. При великому падінні потенціалу поблизу поверхні рідкого катода, коли розміри катодної плями малі, в результаті високої щільності енерговиділення формується струмінь пари, що значно змінює властивості плазми (Балабанов и др., 1992). Калориметричні зміни дозволили оцінити основні канали розсіювання енергії, що вкладаються в розряд. З'ясовано, що витрата на нагрівання розчину, його теплові втрати і нагрівання повітря складає менше половини загальної потужності, яка розсіюється розрядом. Залежність катодного падіння напруги від відстані між анодом і межею розділення фаз при різних тисках газу над поверхнею оброблюваного розчину розглянуто в праці (Кочетов, Максимов, 1991). Зміна напруги на 425 В спостерігається на відстані  $4 \times 10^{-4}$  м від оброблюваної поверхні. При цьому автор підкреслює, що вказана величина є постійною для водних розчинів і не залежить від роду атмосфери в зоні реактора і тиску в ній, матеріалу електродів, відстані до поверхні рідини, а також сили струму розряду та якісного складу електроліту. З цим неможливо погодитися, тому нижче будуть наведені результати експериментальних досліджень, що спростовують такий висновок. Плазмохімічні процеси супроводжуються глибокою хімічною перебудовою молекул. Аналіз умов, що сприяють проведенню реакцій і придушенню небажаних побічних перетворень, регулювання і керування ними, базується на дослідженні термодинамічних закономірностей процесів, які вивчаються. Головними питаннями, що при цьому виникають, є термодинамічна ймовірність реакцій у певних умовах і ступінь перетворення вихідної сировини (Кутепов и др., 1997). Відомо, що умовою можливості протікання мимовільного процесу є  $\Delta G < 0$ , де  $G$  – енергія Гіббса. За постійного тиску і зміни температури

(Корыта И. и др., 1997):

$$dG \leq \sum_1^i \mu_i dn_i, \quad (2.9)$$

де  $n_i$  – молярна концентрація іона  $i$ .

Для реального розчину вираз хімічного потенціалу має вигляд

$$\mu = \mu_i^0 + RT \ln a_i, \quad (2.10)$$

де  $a_i$  – активність, яка пов'язана з концентрацією співвідношенням  $a = \gamma \cdot n$ ,

$\gamma$  – коефіцієнт активності;

$\mu_i^0$  – стандартний хімічний потенціал для  $a_i = 1$ ;

$R$  – універсальна газова постійна;

$T$  – температура, К.

Активність і коефіцієнт активності можливо визначити як на основі експериментальних даних (Добош, 1980), так і використовуючи довідкову літературу (Пикаев, Кабакчи, 1982). Для достатньо розбавлених водних розчинів (до концентрації 0,01 моль/л) при 25 °С коефіцієнти активності розраховуються за формулою Дебая-Гюккеля:

$$\lg \gamma_{\pm} = 0,509 \cdot z_+ \cdot z_- \cdot \sqrt{I}, \quad (2.11)$$

де  $z_+$ ,  $z_-$  – заряди дисоційованих іонів сполуки;

$I$  – іонна сила розчину;

$$I = 0,5 \sum n_i \cdot z_i^2, \quad (2.12)$$

де  $n_i$  – молярна концентрація іона  $i$ .

Для електрохімічних процесів:

$$\Delta G = -nFE, \quad (2.13)$$

де  $F$  – постійна Фарадея;

$E$  – ЕДС гальванічного елемента;

$n$  – число електронів.

Особливістю такої системи є те, що процеси рідкого середовища, контактуючого з низькотемпературною плазмою, відбуваються в нерівноважних умо-

вах, які характеризуються високим рівнем енергії електронів, концентрацією заряджених і збуджених частинок, а також радикалів за низької температури газу (Lee, 1991). Режим нерівноважності реалізується за електронною компонентою, що відповідає умовам переважного збудження електронних ступенів вільності молекул при стимулюванні хімічних реакцій у реакційному просторі. Осьовий градієнт термодинамічного потенціалу у стовпі розряду обчислюється із співвідношення

$$E = 1,23 \cdot \frac{k}{l} \cdot \frac{\sqrt{x}}{l_e} \cdot T_e, \quad (2.14)$$

де  $k$  – постійна Больцмана;

$l$  – довжина стовпа;

$l_e$  – середня довжина вільного пробігу електронів між пружними зіткненнями;

$x$  – частка енергії електрона, що втрачається при зіткненні з нейтральною частинкою;

$T_e$  – температура електрона.

Використовуючи відомі термодинамічні залежності, можливо визначати вірогідність хімічних перетворень у системі, що розглядається.

### 2.3. Компоненти плазми в плазмохімічному реакторі. Хімічні реакції атомів, молекул та іонів

Первинні акти іонізації, дисоціації та дисоціативного прилипання електронів плазми до молекул  $H_2O$  (процеси (2.9), (2.11), (2.13)), а також термічна дисоціація і дисоціація через високозбуджені коливальні рівні молекул води в зіткненнях  $H_2O-H_2O$  (внаслідок збудження коливань молекул  $H_2O$  електронним ударом) приводять до утворення таких іонів, атомів і молекул, як  $H_2O^+$ ,  $OH$ ,  $H$ ,  $OH$ ,  $H$ ,  $H_2$ , що ініціюють ланцюг хімічних іонно-молекулярних реакцій, так що в результаті утворюється велике число нових компонент. Усі компоненти дифундують до стінки – електрода реакційного простору (РП), що омивається во-

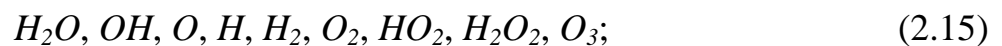


дою, і можуть поглинатися. У такий спосіб відбувається процес активації води. При цьому важливо підкреслити, що так можна отримати активовану воду, піддаючи обробці дистильовану воду, тобто воду, яка не вміщує практично жодних домішок, крім розчинених у ній атмосферних газів (така вода знаходиться в контакті з атмосферою), головними з яких є азот і кисень.

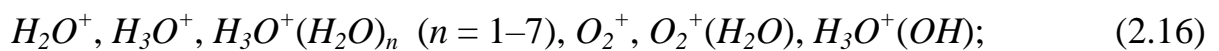
Попередній аналіз, заснований на вивченні великого списку реакцій з реагентами і продуктами, що містять ці елементи, дозволив для умов роботи плазмохімічного реактора провести відбір і включити в модель певні компоненти.

Серед них:

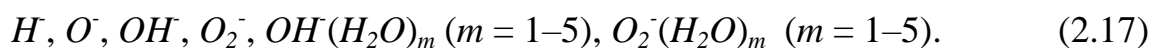
нейтральні атоми і молекули



позитивно заряджені іони



негативно заряджені іони:



У роботі (Сокольский и др., 2004) наводяться списки включених у модель хімічних реакцій, що призводять до утворення і загибелі компонент (2.15) – (2.17). Останні надаються в арреніусівському вигляді

$$k_{ch} = K_C \cdot \left( \frac{T}{300} \right)^\beta \exp \left[ - \frac{E_a}{T} \right], \quad (2.18)$$

і виражені за бінарних зіткнень –  $\text{см}^3/\text{с}$ ; за потрійних зіткнень –  $\text{см}^6/\text{с}$ ; і за мономолекулярного розпаданя –  $1/\text{с}$ ,

де  $K_C$  – множник;  $\beta$ ;

$E_a$  – параметри, значення констант швидкостей  $k_{ch}$ .

Значення констант швидкостей взяті з роботи (Полак и др., 1991). Правда, для бінарних процесів утворення кластерних іонів  $H_3O^+(H_2O)_n$ ,  $OH^-(H_2O)_m$  та їх мономолекулярного розпаданя абсолютних значень констант у літературі не знайдено, і тому використані наближені значення, але такі, щоб вони включали експериментально виміряні енергії дисоціації (відриву молекули  $H_2O$  від клас-

тера) і давали експериментально виміряні константи рівноваги, надані в авторами (Мак-Ивен, Филлипс, 1978).

Узагальнюючи перелік хімічних реакцій, які беруть участь у хімічних перетвореннях як результат плазмової активації води, зазначимо, що їх можливо подати в такому вигляді:

- ❖ реакції з  $H_2O$ ,  $OH$ ,  $O$ ,  $H$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ ;  $HO_2$ ;  $H_2O_2$ ;  $O_3$ ; мономолекулярні реакції розпадання іонів  $H_3O^+$ ;

- ❖ хімічні реакції для негативних іонів  $O_2^-$ ,  $H$ ,  $O^-$ ,  $O_2^-$ ; мономолекулярні реакції розпадання іонів  $O_2^-$ ,  $H$ ,  $O^-$ ,  $O_2^-$ ,  $OH$ ;

- ❖ реакції вивільнення електрона  $O_2^-$ ,  $H$ ,  $O^-$ ,  $O_2^-$ ,  $OH$ ;

- ❖ іон-іонна рекомбінація;

- ❖ процеси зіткнень електронів з малими складовими;

- ❖ хімічні реакції коливально-збуджених молекул  $H_2O$ ;

- ❖ хімічні реакції, зв'язані з релаксацією коливальної енергії  $H_2O$ .

Процеси взаємної нейтралізації іонів

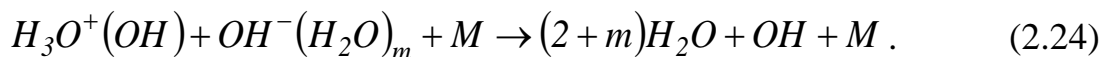
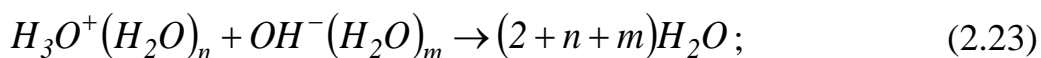


мають великі константи швидкості внаслідок великого кулонівського перетину зіткнення. На жаль, ці константи, а також нейтральні продукти рекомбінації для більшості з досліджуваних нами процесів невідомі. З цієї причини для констант швидкостей  $k_{irec}$  всіх процесів іон-іонної рекомбінації при бінарних і потрійних зіткненнях були прийняті однакові, запропоновані дослідниками (Capitelli et al., 2000) значення, рівні відповідно

$$k_{irec} \text{ (см}^3\text{/с)} \approx 10^{-7} \left( \frac{300}{T} \right)^{0.5} , \quad (2.21)$$

$$\text{або} \quad k_{irec} \text{ (см}^6\text{/с)} \approx 10^{-25} \left( \frac{300}{T} \right)^{2.5} , \quad (2.22)$$

а за продукти реакцій (1.19), (1.20) прийняли стабільні двох- або трьохатомні молекули і додатково (за необхідністю) атомарний або молекулярний радикал. Наприклад, маємо процеси:



Аналогічно формулам (2.23), (2.24) легко можуть бути записані й інші конкретні реакції іон-іонної рекомбінації за участі іонів із списків (2.16) та (2.17). Зазначимо, що в моделі і у формулах (2.21), (2.22) прийнята, зазвичай, температура іонів, яка дорівнює температурі газу  $T$ . Крім процесів зіткнення плазмових електронів з молекулами води, що є головною компонентою газової фази реакційного простору, в об'ємі РП відбуваються також зіткнення цих електронів з малими складовими – атомами, молекулами, іонами. У деяких випадках такі зіткнення можуть істотно впливати на концентрації цих та інших (утворених у результаті зіткнень) компонент, і у тому числі на концентрацію самих електронів. Більш важливими для умов роботи плазмохімічного реактора вважаються процеси дисоціативної рекомбінації і прилипання електронів.

Константи швидкостей  $k_{drec}$  і  $k_{att}$  (см<sup>3</sup>/с) взяті в основному з роботи; температура електронів  $T_e$  в цій формулі для  $k_{drec}$  виражена в градусах К.

Як видно зі списку реакцій, представлених авторами, до моделі включені ендотермічні реакції з надто великими енергіями активації  $E_a$  (Сокольский и др., 2004). Існує, однак, ще один канал подолання активаційного бар'єра ендотермічних реакцій – через високозбуджені коливальні стани молекул-реагентів. Тут особливо цікавими для вивчення є ендотермічні реакції за участі молекул-реагентів  $H_2O$ . Це зумовлено тим, що значна частка електричної енергії розряду внаслідок непружних зіткнень плазмових електронів з молекулами  $H_2O$  йде на збудження їх коливальних ступенів вільності. Так, за температури електронів  $T_e \approx 0,5 - 1,5$  еВ у розряді в парах води приблизно 60–80 % від енергії розряду першочергово надходить у коливання  $H_2O$ . Тому зрозуміло, що дуже перспективним для отримання нового хімічного продукту був би режим, за якого ця

енергія використовувалась у подоланні активаційного бар'єра реакцій і, відповідно, в їх прискоренні. Це виявляється можливим, якщо в розряді в робочому режимі запас коливальної енергії молекул  $H_2O$  підтримується нерівноважним, а саме, перевищуючим (за рахунок, передусім, збудження коливань електронним ударом) його рівноважне значення, відповідне температурі газу  $T$ . У цьому випадку константи швидкостей ендотермічних реакцій з молекулами-реагентами  $H_2O$  збільшуються. Для кількісного описання збільшення констант швидкостей цих реакцій, в умовах нерівноважного запасу коливальної енергії молекул  $H_2O$ , використана модель гармонічних осциляторів для нормальних коливальних мод  $H_2O$  в запропонованні більш швидкими вважати (серед різних процесів, що міняють заселеність коливальних рівнів) процеси коливально-коливального енергообміну ( $VV'$ - процеси). Така модель є виправданою для умов у РП і дає можливість описати нерівноважний запас коливальної енергії в  $H_2O$  невеликим числом зручних параметрів: коливальними температурами  $T_n$  коливальних мод « $n$ » (у молекулі  $H_2O$  три такі моди). Для описання вкладу коливальної енергії молекул-реагентів у подолання активаційного бар'єра реакції скористаємося також двома моделями. Для реакції дисоціації будемо використовувати загальноприйнятту модель переважної дисоціації з коливальних рівнів у межі дисоціації, а для останніх реакцій заміщення або обміну – відому евристичну  $\alpha$ -модель (Boyarchuk, Karelin, 1997). У цьому випадку збільшення констант швидкостей реакцій в умовах нерівноважного запасу коливальної енергії, коли коливальні температури  $T_n \geq T$ , описуються додатковими множниками  $\Phi(T_n, T)$  до рівноважних констант. Ці множники мають такий вигляд:

для реакції дисоціації

$$\Phi(T_n, T) \approx \frac{\prod_{j=1}^3 Q_j(T)}{\prod_{j=1}^3 Q_j(T_j)} \exp \left\{ -E^* \left( \frac{3}{\sum_j kT_j} - \frac{1}{kT} \right) \right\}; \quad (2.25)$$

для реакцій заміщення або обміну

$$\Phi(T_n, T) \approx \frac{\prod_{j=1}^3 Q_j(T)}{\prod_{j=1}^3 Q_j(T_j)} \prod_{j=1}^3 Z_j(\alpha_j, T_j, T), \quad (2.26)$$

де функції  $Z_j(\alpha_j, T_j, T)$  визначаються виразом

$$Z_j(\alpha_j, T_j, T) \approx \left[ \frac{\exp\left(-\frac{E_a}{\alpha_j k T_j}\right) - \exp\left(-\frac{E_a}{k T}\right)}{\exp\left(\frac{\alpha_j \theta_j}{T} - \frac{\theta_j}{T_j}\right) - 1} + \frac{\exp\left(-\frac{E_a}{\alpha_j k T_j}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{\theta_j}{T_j}\right)} \right] \times$$

$$\times \left[ \frac{\exp\left(-\frac{E_a}{\alpha_j k T}\right) - \exp\left(-\frac{E_a}{k T}\right)}{\exp\left(\frac{\alpha_j \theta_j}{T} - \frac{\theta_j}{T}\right) - 1} + \frac{\exp\left(-\frac{E_a}{\alpha_j k T}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{\theta_j}{T}\right)} \right]^{-1} \quad (2.27)$$

У формулах (1.25), (1.26)

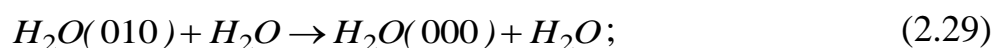
$$Q_j(T_j) = g_j \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\theta_j}{T_j}\right) \right]$$

є коливальна статсума моди  $j$  при температурі  $T_j$ ;  $\theta_j$  – характеристична температура коливань моди  $j$  (тобто енергія її коливального кванта в К);  $E_a$  – енергія активації реакції, що вивчається;  $E^*$  – деяке значення коливальної енергії, при перевищенні якого відбувається перемішування коливальних станів і перехід до квазіконтиніуму коливального спектра. Величина  $E^* \leq D$  (де  $D$  – енергія дисоціації молекули) і її практично неможливо точно визначити. Тому для простоти в розрахунках  $E^* \approx D$ . У формулі (2.27) параметр  $\alpha_j$  характеризує ефективність коливальної енергії моди  $j$  в подоланні активаційного бар'єру реакції. Його конкретне значення встановлюється часткою  $\xi_j$  від загальної енергії, що виділяється в екзотермічній реакції (оберненою до дослідної ендотермічної реакції) і надходить у моду  $j$ . Звична частка  $\xi_j < 0,3$  і тоді для  $\alpha_j$  маємо

$$\alpha_j \approx 1 - \frac{1}{\xi_j} \frac{kT}{E_a} \quad (2.28)$$

При виведенні виразу (2.22) передбачалося також, що  $kT < \xi_j E_a$ . Формула (2.22) використана для знаходження  $\alpha_j$ , прийнявши типові значення  $\xi_j \approx 0,1$  (дійсні величини  $\xi_j$  невідомі). Легко бачити із (2.25), (2.26), що при рівновазі, коли  $T_j = T$ , множники  $\Phi(T_j, T) = 1$ , тобто ефект прискорення реакції відсутній.

Енергія, що надходить у коливання молекул  $H_2O$  переважно в зіткненнях з електронами, лише частково може йти на подолання енергетичного бар'єра ендотермічних реакцій, обговорюваних вище. Зазвичай же до головних каналів релаксації її в коливальних модах належать процеси обміну енергії між модами ( $VV'$ - процеси) і перехід енергії на поступальні ступені вільності ( $VT$ - процеси). Для молекули  $H_2O$  моди ( $00\nu$ ) і ( $\nu 00$ ) зазвичай знаходяться в квазірівновазі (внаслідок великої швидкості енергообміну між ними) і основним каналом релаксації енергії цих мод є обмін енергією з деформаційною модою ( $0\nu 0$ ). Взагалі ж, релаксація коливальної енергії всіх мод на поступальні ступені вільності здійснюється в основному через  $VT$  – процеси за участі деформаційної моди ( $0\nu 0$ ). Константа швидкості  $k(010)$  такого процесу через нижній коливальний рівень ( $010$ ) у зіткненнях з  $H_2O$



визначена експериментально та апроксимується виразом (Королев, Месяц, 1991)

$$k(010) \approx 9,6 \cdot 10^{-6} \left( \frac{T}{300} \right) \exp \left\{ -\frac{228,2}{T^{1/3}} + \frac{930,5}{T^{2/3}} \right\}. \quad (2.30)$$

Тут  $k(010)$  виражена в  $\text{см}^3/\text{с}$ ; температура газу – в К.

Побудова математичної моделі, яка була б адекватною результатам експериментальних досліджень, є важкою задачею, яка ускладнюється тим, що процес контактної дії плазмового розряду супроводжується взаємодією в об'ємі рідини з короткоживучими частинками, іонами, радикалами і т.п. Ґрунтуючись на результатах досліджень обробки води і літературних даних з математичного

моделювання (Полак и др., 1984; Князев, 2003), у систему, що розглядається, були включені нейтральні молекули та іони, утворення яких відображає основні ефекти сольватації та іонізації внаслідок контактної дії нерівноважної плазми на поверхню води.

Можливість здійснення процесів, що протікають у системі рідина – газ, у вигляді єдиної системи, постійність напруг у широкому діапазоні щільності струму, а також той факт, що при існуючому діапазоні змін температур, швидкості реакцій істотно не змінюються – дозволяється застосовувати деякі залежності, що описують імпульсний радіоліз.

Проста модель хімічної кінетики відповідає процесу замкнутої однорідної системи, всі точки якої характеризуються однаковими температурою, тиском, концентраціями речовин і інтенсивністю випромінювання. Передбачається, що реакції йдуть тільки в об'ємі рідини.

Незалежна перемінна в розглянутій моделі – час ( $\tau$ ). Контрольовані параметри: температура, кількість енергії, підведеної до системи. Процес у цілому розглядається як сума елементарних реакцій.

Відстежити проміжні стадії процесу фактично не можливо внаслідок складності діагностичної апаратури, великої кількості проміжних сполук, швидкість формування яких надто висока. Очевидним фактором є відсутність надійних даних про константи швидкостей хімічних процесів і тому в таких випадках фігурантом є гіпотетичний механізм хімічних перетворень з прогнозованим виходом цільових продуктів.

Розв'язанню подібного роду кінетичних задач присвячено багато наукових досліджень, серед яких виділяються праці Полака Л.С., Гольденберга М.Я. та інших (1984). В них основою кінетичної моделі є системи звичайних диференціальних рівнянь (ЗДУ) зі заданими початковими умовами, що дають у сукупності результат у вигляді розподілення стабільних молекул реагуючих компонентів в об'ємі реакційного простору.

Відповідно до постулату хімічної кінетики швидкість реакції пропорційна концентраціям частинок, що беруть участь в елементарному акті хіміч-

ної взаємодії. При заданому механізмі процесу, з урахуванням незалежності елементарних стадій, будується система звичайних диференціальних рівнянь, яка описує зміну концентрацій всіх речовин з плином часу. Експериментальні дослідження процесу активації дистильованої води показали, що температуру можливо вважати постійною в період часу  $\tau = 0-3 \times 10^2$  с; отже, константи швидкості реакцій на цих ділянках практично є постійними.

При складанні моделі враховували, що процес контактної дії на рідину містить поєднання трьох ефектів: УФ-випромінювання, яке сприяє утворенню гідратованих електронів, що мають високу реакційну здатність; хімічних перетворень на поверхні розділу фаз газ-рідина, викликаних масопереносом заряджених частинок із зони розряду; електрохімічних процесів, що протікають у шарі рідини, і для яких електрохімічна стадія, на відміну від традиційних процесів технічної електрохімії, протікає в більш сприятливих умовах за рахунок зниження дифузійних обмежень і внаслідок цього при менших значеннях енергії активації.

Беручи до уваги, що відомості про константи швидкості хімічних реакцій у літературі (Коробов, 2004) інколи носять розрізнений характер, проводили оцінку деяких із них на підставі обговорення термодинамічних характеристик і констант рівноваги (табл. 2.4).

У табл. 2.5 наведено плазмохімічні виходи окремих компонентів реакційного середовища, прийняті до уваги під час розрахунку кінетичних залежностей розподілення концентрацій реагуючих компонентів у процесі плазмової обробки водяного середовища.

Катодні процеси електрохімічного виділення водню, протікають відповідно до реакції



Даний процес залежить тільки від сили струму процесу і характеристики електрода, і визначається за законом Фарадея.

Фотохімічна дія УФ випромінювання на процес активації проявлялась у розкладанні пероксиду водню на активні радикали.





Таблиця 2.4. Реакції, які враховані при розрахунку концентраційних залежностей у процесі плазмохімічної обробки хімічно чистої води

№ пп.	Реакція	Константа швидкості при 25 °С
1.	$OH + H_2 \rightarrow H + H_2O$	$k_1=3,6 \cdot 10^7$
2.	$OH + H_2O_2 \rightarrow HO_2 + H_2O$	$k_2=5 \cdot 10^7^*$
3.	$OH + O_2^- \rightarrow O_2 + OH$	$k_3=1,0 \cdot 10^{10^*}$
4.	$H + O_2 \rightarrow H_2O$	$k_4=1,2 \cdot 10^{10^*}$
5.	$H + O_2^- \rightarrow HO_2^-$	$k_5=2,0 \cdot 10^{10}$
6.	$e_{aq} + O_2 \rightarrow O_2^-$	$k_6=1,9 \cdot 10^{10}$
7.	$e_{aq} + H_2O_2 \rightarrow OH + OH$	$k_7=1,2 \cdot 10^{10}$
8.	$e_{aq} + O_2^- \xrightarrow{(H_2O)} OH + OH$	$k_8=1,3 \cdot 10^{10}$
9.	$e_{aq} + H^+ \rightarrow H$	$k_9=2,2 \cdot 10^{10}$
10.	$e_{aq} + H_2O \rightarrow H + OH$	$k_{10}=2,2 \cdot 10^{10}$
11.	$e_{aq} + H_2O \rightarrow O^- + OH$	$k_{11}=3,5 \cdot 10^9$
12.	$OH + OH \rightarrow H_2O_2$	$k_{12}=8,0 \cdot 10^9$
13.	$OH + HO_2 \rightarrow H_2O + O_2$	$k_{13}=1,2 \cdot 10^{10}$
14.	$H + HO_2 \rightarrow H_2O_2$	$k_{14}=2,0 \cdot 10^{10}$
15.	$H + H_2O_2 \rightarrow H_2O + OH$	$k_{15}=9,0 \cdot 10^7$
16.	$H + OH \rightarrow e_{aq} + H_2O$	$k_{16}=2,1 \cdot 10^7$
17.	$HO_2 + O_2^- \rightarrow O_2 + HO_2^-$	$k_{17}=8,9 \cdot 10^7$
18.	$HO_2 + HO_2 \rightarrow H_2O_2 + O_2$	$k_{18}=2,0 \cdot 10^6$
19.	$H^+ + O_2^- \rightarrow HO_2$	$k_{19}=5,1 \cdot 10^{10}$
20.	$HO_2 \rightarrow H^+ + O_2^-$	$k_{20}=7,0 \cdot 10^5$
21.	$H^+ + HO_2^- \rightarrow H_2O_2$	$k_{21}=1,58 \cdot 10^{10}$
22.	$H_2O_2 \rightarrow H^+ + HO_2$	$k_{22}=3,6 \cdot 10^{-2^*}$
23.	$OH + OH \rightarrow H_2O + O^-$	$k_{23}=1,2 \cdot 10^{10}$
24.	$O^- + H_2O \rightarrow OH + OH$	$k_{24}=1,7 \cdot 10^6$
25.	$H^+ + OH \rightarrow H_2O$	$k_{25}=1,4 \cdot 10^{11}$
26.	$H_2O \rightarrow H^+ + OH$	$k_{26}=2,6 \cdot 10^{-5}$
27.	$H + OH \rightarrow H_2O$	$k_{27}=2,0 \cdot 10^{10}$
28.	$H + H \rightarrow H_2$	$k_{28}=1,0 \cdot 10^{10}$
29.	$e_{aq} + H \xrightarrow{(H_2O)} H_2 + OH$	$k_{29}=2,5 \cdot 10^{10}$
30.	$e_{aq} + e_{aq} \xrightarrow{(H_2O)} H_2 + 2OH$	$k_{30}=5,0 \cdot 10^9$
31.	$e_{aq} + OH \rightarrow OH$	$k_{31}=3,0 \cdot 10^{10}$
32.	$O^- + O_2 \rightarrow O_2^-$	$k_{32}=3,0 \cdot 10^9$
33.	$O^- + H_2 \rightarrow H + OH$	$k_{33}=8,0 \cdot 10^9$
34.	$O^- + H_2O_2 \rightarrow H_2O + O_2^-$	$k_{34}=2,0 \cdot 10^8$
35.	$OH + HO_2^- \rightarrow HO_2 + OH$	$k_{35}=5,0 \cdot 10^9$
36.	$HO_2^- + O^- \rightarrow OH + O_2^-$	$k_{36}=8,0 \cdot 10^8$
37.	$O_2^- + H_2O_2 \rightarrow O_3^- + O_2 + H_2O$	$k_{37}=1,6 \cdot 10^6$
38.	$O_3^- + HO_2^- \rightarrow O_2^- + O_2 + OH$	$k_{38}=8,9 \cdot 10^5$

Таблиця 2.5. Плазмохімічні виходи, використані в розрахунку концентраційних залежностей у процесі обробки води

Компонент	$e_{aq}$	$H$	$H^+$	$OH$	$H_2$	$OH$	$HO_2^-$	$HO_2$	$H_2O_2$	$O_2^-$	$O_2$
Первинний вихід, (молекул / 100 еВ), $G$	2,5	0,6	2,6	2,55	0,4	0,5	–	–	0,7	–	–

де  $h\nu$  – квант світла, що має достатньо енергії для руйнування пероксидного з'єднання.

Кількість таких частинок визначається згідно зі законом фотохімічної еквівалентності як

$$C_p = \gamma_0 \cdot C_\phi = E / h\nu, \quad (2.33)$$

де  $E$  – кількість поглиненої світлової енергії;

$C_\phi$  – число поглинених квантів;

$C_p$  – число молекул, які прореагували ;

$\gamma_0$  – квантовий вихід речовини.

Вплив УФ випромінювання на воду враховували в плазмохімічних виходах, наданих у табл. 2.4.

Система рівнянь, що враховує всі перелічені процеси, надана нижче

$$\frac{dy}{dt} = F_i(y_1, y_2, \dots, y_N, \tau); \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2.34)$$

де  $N$  – число учасників реакції;

$y_i$  – їх концентрації.

$$F_i = P(\tau) \cdot a \cdot \left( \sum_{\alpha} c_{i\alpha} \cdot g_{i\alpha} \cdot y_{1\alpha} \right) + \left( \sum_p c_{i\beta} \cdot k_{\beta} \cdot y_{1\beta} \right) + \left( \sum_p c_{i\gamma} \cdot k_{\gamma} \cdot y_{1\gamma} \cdot y_{2\gamma} \right) + \left( \sum_{\Delta} c_{\Delta} \cdot f_{i\Delta} \right) + P(\tau) \cdot b \cdot \left( \sum_F c_F \cdot y_{1F} \cdot y_{2F} \right), \quad (2.35)$$

де  $P(\tau)$  – кількість енергії, що витрачається на обробку води;

$\tau$  – анодна напруга;

$U_n$  – напруга на поверхні розділення фаз газ–рідина, знайдені в результаті зондових вимірювань;

$\eta$  – коефіцієнт, що враховує втрати;

$I_a$  – сила струму процесу;

$a$  – частка енергії, що витрачається на плазмохімічні процеси;

$b$  – частка енергії, що припадає на УФ-випромінювання;

$\alpha, \beta, \gamma, \Delta$  – коефіцієнти указують на плазмохімічні реакції 1-го порядку, хімічні реакції 1-го порядку, хімічні реакції 2-го порядку, електрохімічні та фотохімічні реакції відповідно;

$C_{i\alpha}, C_{i\beta}, C_{i\gamma}, C_{i\Delta}, C_{iF}$  – множники, що враховують число взаємодіючих частинок;

$g_a = G_a / y_{1a}^0$  – константа швидкості для радіаційних реакцій;

$y_{1a}^0$  – початкова концентрація речовини;

$k$  – константи швидкостей відповідних реакцій;

$y$  – текучі концентрації речовин;

$f_{i\Delta}$  – вихід за законом Фарадея:  $f_{i\Delta} = I_a \cdot At / (z \cdot F)$ ,

де  $A_t$  – коефіцієнт, що враховує вплив матеріалу електрода;

$z$  – кількість електронів, що беруть участь у реакції;

$F$  – число Фарадея.

Враховуючи жорсткість даної системи, що полягає у великому розкиданні значень коефіцієнтів при перемінних, використання для рішення даної системи методів Ейлера і Рунге-Куты не є доцільним із-за тривалості розрахунків.

Метод Розенброка (Пивоваров, Сергеева, 1999), спеціально призначений для розв'язання «жорстких» систем, дозволяє вирішувати подібні системи з достатнім ступенем точності при значно менших витратах часу.

Використання наданої моделі дає можливість врахувати вклад кожної конкретної реакції у виходи продуктів реакції, що дозволяє аналізувати процеси, які відбуваються, без виконання додаткових досліджень, не потребують застосування спеціального дорогого обладнання та реактивів. Найбільший інтерес має процес накопичення заряджених частинок у дистилаті, які проявляються у вигляді зростання сили струму процесу. Згідно з отриманими експериментальними даними, його зростання спостерігається при обробці дистилату про-

тягом перших  $3 \times 10^2$  с. Запропонована математична модель дозволяє виявити механізм процесу, який приводить до зростання провідності стовпа розряду, що в свою чергу дозволить оптимізувати процес активації води. Конкретні приклади, наведені в праці (Пивоваров, Сергеева, 1999), аналіз різних математичних моделей демонструють високу ефективність систем *MATHCAD* і *MAPLE* при рішенні прямої та зворотної кінетичних задач. При цьому в багатьох випадках немає необхідності у використанні спеціалізованого програмного забезпечення, призначеного для кінетичних розрахунків.

Важливим етапом розрахунку є вибір початкових наближень для обчислюваних констант швидкостей окремих стадій хімічної реакції. У *MATHCAD PROFESSIONAL* реалізовані методи Булиш-Стойєра і Розенброка. При цьому в першому з них кількість рівнянь обмежена. Нами розглянуто розв'язок прямої кінетичної задачі з використанням методу Розенброка для підтвердження адекватності розрахункових і експериментальних даних процесу хімічних перетворень у водному розчині.

З цією метою задаємось граничними умовами: на вході силою струму, напругою, тиском у системі, початковими концентраціями реагуючих компонентів. На виході: кінцеві концентрації продуктів реакцій, виражені в молях на одиницю об'єму.

Складовою частиною розрахунків є визначена кількість енергії, підведеної до системи

$$P_p = U_a \cdot I_a \cdot K_p / N_a, \quad (2.36)$$

де  $U_a$  – напруга на аноді;

$I_a$  – сила струму;

$K_p = 0,2422 \times 10^{18}$  – коефіцієнт переведення Дж в електрон-Вольти;

$N_a$  – число Авогадро.

Кількість енергії, що витрачається на плазмохімічні процеси і фотоліз,  $P_l$ ,  $P_f$ , відповідно,

$$P_l = P_p \cdot a / V, \quad (2.37)$$

де  $a$  – частка енергії, що витрачається на плазмохімічні процеси;

$V$  – об'єм реакційного простору.

$$P_{\text{if}} = P_p \cdot b / (V \cdot c), \quad (2.38)$$

де  $b$  – частка енергії, що доводиться на УФ-випромінювання;

$c$  – коефіцієнт, що враховує частку поглинених квантів.

*Алгоритм кроків з реалізації програми.* Задаємо матрицю кодів компонентів хімічних реакцій, що складаються з механізму системи і початкових концентрації  $Y_i$  компонентів:  $Y_i = 55,4$ . Інші за умовчужанням вважаються рівними нулю. Вектор правих частин диференціальних рівнянь надамо у вигляді матриці  $vDf(y,t)$ . При задаванні правих частин диференціальних рівнянь виконаємо умову позитивності концентрацій, вибираючи максимальне значення між нулем і отриманим значенням. При задаванні матриці Якобі враховуємо обмеження *MATHCAD PROFESSIONAL* на введення вручну матриці, що містить понад 100 елементів, для чого об'єднаємо в одну декілька матриць за допомоги функції *Augment*. Наприклад:

$$J(t,y) := \text{augment}(vDf(y,t), J_1(t,y), J_2(t,y), J_3(t,y)). \quad (2.39)$$

Точність задаємо Використовуючи функцію стандартної *TOL*, задаємо точність. Результат наведений у вигляді матриці *MT*, значення якої отримуємо за допомогою функції *Stiffn* ( $Y, x_1, x_2, npoints, D, J$ ), де  $x_1 = 0$ ,  $x_2 = 1200$  – початковий і кінцевий моменти часу,  $npoints = 4000$  – кількість кроків

$$MT := \text{Stiffn}(vY, 0, 400, 4000, vDf, J). \quad (2.40)$$

Для кращої наочності результати надані в графічній формі безпосередньо в *MATHCAD* (рис. 2.3–2.6). Результати розрахунків дають можливість оцінити адекватність наданої моделі шляхом порівняння розрахункових і експериментальних даних, відстежити вплив зміни концентрацій проміжних сполук на виході продуктів реакції протягом усього періоду плазмової обробки дистиляту, а також вклад кожного з спостережуваних ефектів у процес активації. Розмір середньоквадратичного відхилення за тривалості обробки  $3 \times 10^2$  с не перевищив  $0,03 \times 10^{-3}$ ; коефіцієнт кореляції дорівнював 0,9.

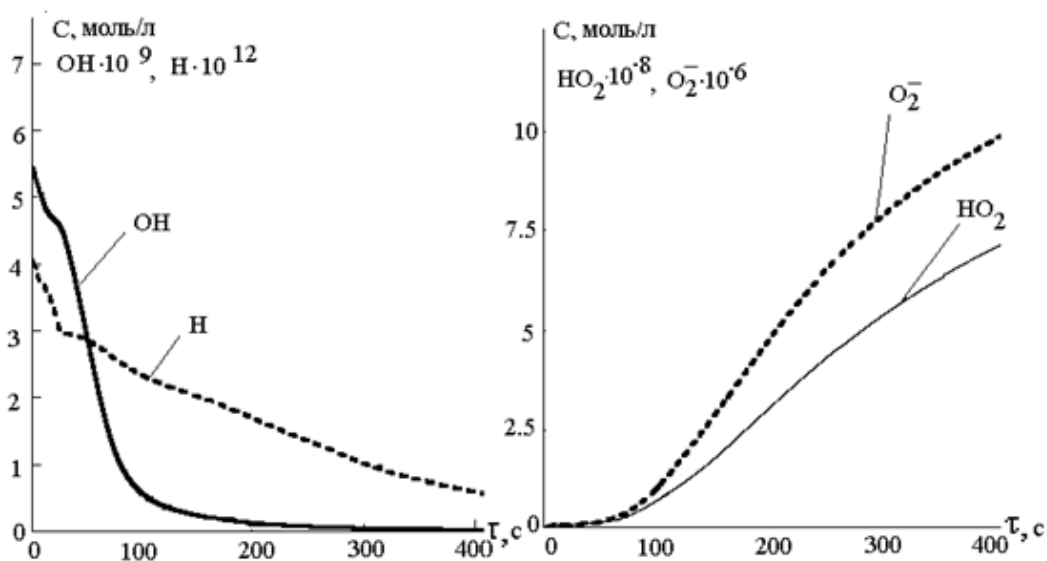


Рис. 2.3. Зміни концентрацій радикалів  $H$ ,  $OH$ ,  $O_2^-$ ,  $HO_2$  у процесі плазмової обробки хімічно чистої води

Кінетичні залежності дозволяють оцінити характер змін заряджених частинок під час обробки. Подальший аналіз отриманих результатів свідчить про адекватність розрахункових і експериментальних даних.

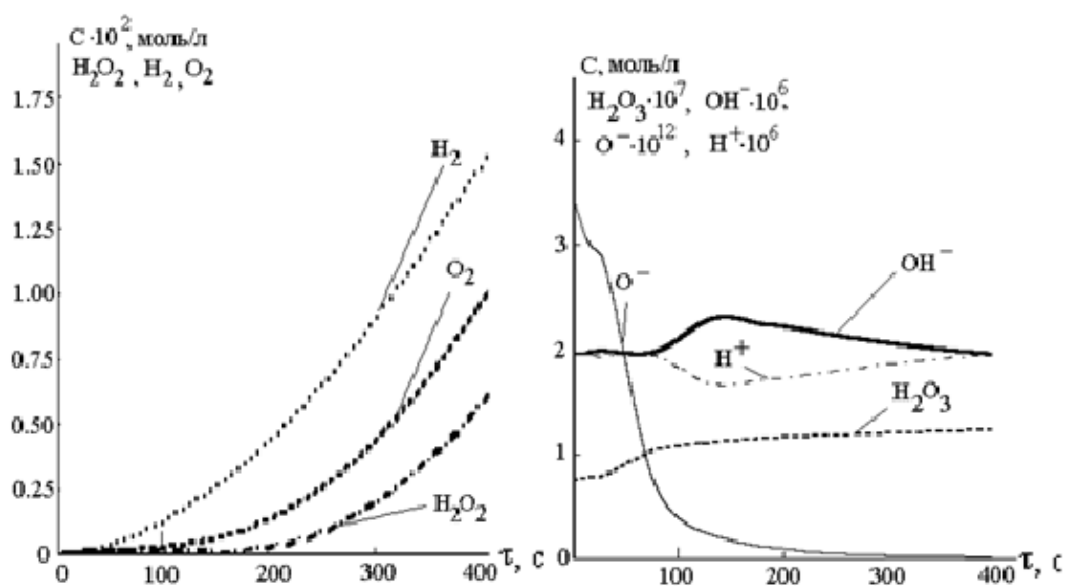


Рис. 2.4. Зміна концентрацій продуктів реакції  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O_2$ ,  $H_2O_3$  та іонів  $O^-$ ,  $H^+$ ,  $OH^-$  у процесі обробки хімічно чистої води

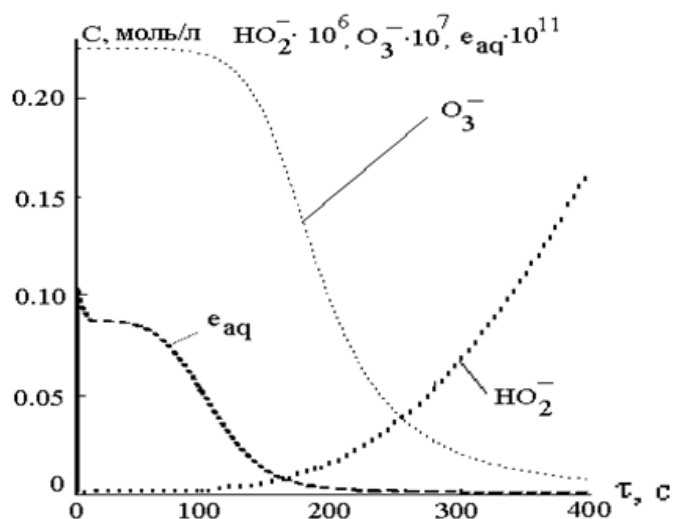


Рис. 2.5. Зміна концентрацій гідратованих електронів  $e_{aq}^-$  і радикалів  $O_3^-$ ,  $HO_2^-$  під час обробки хімічно чистої води

Відтак встановлено, що хімічно нейтральне середовище, яким є хімічно чиста вода (дистилят), чутливо реагує на дію плазмового розряду на поверхні розподілу фаз.

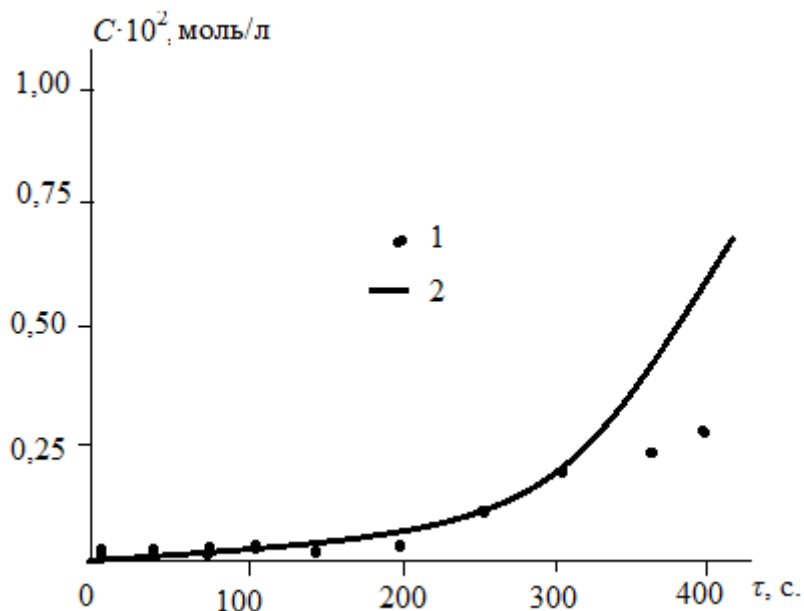


Рис. 2.6. Зіставлення експериментальних і розрахункових кінетичних кривих накопичення пероксиду в хімічно чистій воді:

1 – експериментальні дані; 2 – розрахункові дані

У результаті енергетичного збудження змінюються характер і розмір енергії зв'язків молекул, що призводить до утворення нових частинок і радикалів. Унаслідок короткого терміну життя даних компонентів їх експериментальне визначення є надто ускладненим. Розрахунковим шляхом довелося встановити тривалість їх стабільного існування. З'ясовано, що під час обробки утворюються надперекисні сполуки, період піврозпаду яких доводять автори (Черняєва и др., 1963), за кімнатної температури становить декілька секунд. Їх присутність у розчині, хоч і в незначних концентраціях, сприяє інтенсивному утворенню активних частинок, які, ймовірно, є основними носіями властивостей активованої контактної плазми води.

Отримані залежності дозволяють оголосити частинки, які спочатку в даний момент часу визначають вихід пероксидних сполук. Так, у початковий момент часу утворення пероксидних сполук обумовлено наявністю *ОН*-радикалів. Далі, в результаті зниження їх концентрацій, формування пероксиду обумовлено наявністю  $HO_2$  і  $HO_2^-$ . При розгляданні вкладів спостережуваних ефектів з'ясовано, що вклад кожного з них приблизно на два порядки нижчий, ніж при їх синергетичній дії. За допомогою наданої моделі з'ясоване відсоткове розподілення енергії, що витрачається на різні хімічні процеси. Так, на частку плазмохімічних процесів припадає, залежно від параметрів обробки, 10–20 %, на частку УФ-випромінювання витрачається 5–20 %, а остання енергія надсилається на електрохімічні, дифузійні і масообмінні процеси. Із розрахунків маємо, що зі збільшенням потужності енергетичного впливу істотні обмеження встановлені температурними характеристиками рідини при розрядженні. Згідно з ними визначено оптимальний час протікання процесу.

Детальний аналіз результатів розрахунку кінетичних характеристик хімічних перетворень у воді і водних розчинах під дією контактної нерівноважної низькотемпературної плазми виконаний у наступних працях (Пивоваров, Сергеева, Дубовик, 2009; Пивоваров, Сергеева, Овчаренко, 2009). Однак всі вони підтверджують головну тезу: незважаючи на складність досліджуваних процесів, у водних розчинах, унаслідок рекомбінаційних процесів, утворюються ста-



більні атоми і молекули, що суттєво впливають на формування особливої структури цих розчинів і на зміну їх фізико-хімічних властивостей, відповідно.

#### 2.4. Термодинамічний аналіз накопичення поліоксиду водню

Обробка води плазмохімічним методом базується на здійсненні плазмового розряду в парах води над поверхнею рідкої фази. Основну роль у фізико-хімічних перетвореннях займають процеси, в яких беруть участь плазмові електрони. За рахунок процесів іонізації, дисоціації і дисоціативного прилипання електронів плазми до молекул води, термічної дисоціації і дисоціації через збуджені коливальні рівні молекул води в зіткненнях  $H_2O - H_2O$  утворюються такі іони, атоми і молекули, як  $H_2O^+$ ,  $OH$ ,  $H$ ,  $H^+$ ,  $H_2$ , що ініціюють ряд хімічних іонно-молекулярних реакцій, внаслідок яких утворюється велика кількість нових компонентів. Такі елементи, як уже згадувалося, дифундують до стінки – електроду реакційного простору, що омивається водою, і можуть поглинатися, обумовлюючи процес активації води. Під час активації води нерівноважною плазмою за рахунок дипольного моменту та підведення високої напруги до системи відбувається часткова переорієнтація молекул (Райцимринг, Цветков, 1980).

На першому етапі дії контактної нерівноважної плазми спостерігається реакція утворення іонів, збуджених молекул води і вторинних електронів:



Після зіткнення частинки зникають згідно з такими реакціями:

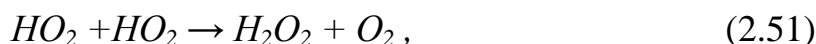
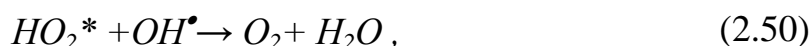


Початкова концентрація таких частинок у воді достатньо висока, тому з високою ймовірністю протікають реакції рекомбінації радикалів з утворенням продуктів активації:



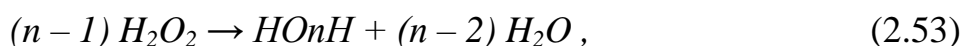
У подальшому мають місце радикал-реакції, які приводять до ланцюгового механізму розкладу води і формування пероксидних й надпероксидних сполук.

Утворені під дією контактної нерівноважної плазми гідроперекисні радикали особливо інтенсивно виникають у воді, що містить розчинений кисень. У свою чергу гідроперекисний радикал сприяє утворенню кисню:



Пероксид водню, що накопичується в ході хімічних перетворень, схильний до полімеризації з утворенням поліоксидів водню.

У загальному випадку процес можна описати таким сумарним рівнянням:



З використанням термодинамічного підходу була проведена оцінка ймовірності реалізації різних маршрутів процесу утворення пероксиду водню і його полімерних сполук.

Тепловий ефект реакцій розраховували з огляду на теплоту утворення при стандартній термодинамічній температурі 298 К

$$\Delta H^\circ = \sum (v_i \Delta H_{f,i}^\circ)_{\text{прод.}} - \sum (v_i \Delta H_{f,i}^\circ)_{\text{реаг.}} \quad (2.59)$$

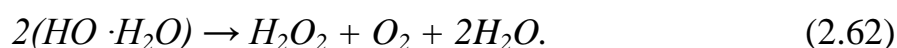
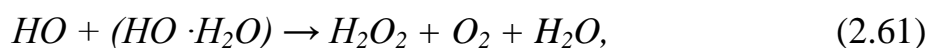
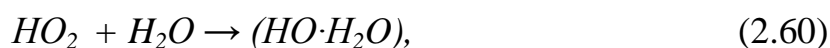
Під час розрахунку вільної енергії Гіббса були використані відповідні величини для продуктів реакції і вихідних речовин. За відсутності цих даних розрахунки енергії Гіббса для ряду речовин були виконані з використанням значень ентальпії та ентропії утворення.

Термодинамічні дані для реакцій синтезу пероксиду водню наведені в табл. 2.6.

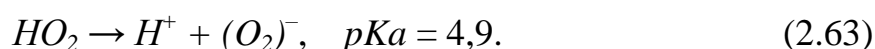
Таблиця 2.6. Тепловий ефект і вільна енергія Гіббса реакцій утворення пероксиду водню при температурі 298 К

Реакція	$\Delta H^\circ$ , кДж/моль	$\Delta G^\circ$ , кДж/моль
$\cdot OH + OH \rightarrow H_2O_2$	- 262,4	- 188,8
$HO_2 + HO_2 \rightarrow H_2O_2 + O_2$	- 208,8	- 165,6
$HO_2 + H \rightarrow H_2O_2$	- 416,3	- 363,3

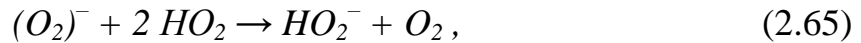
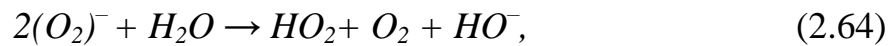
З отриманих термодинамічних даних видно, що реакції, які протікають, є екзотермічними з мінімальним виділенням тепла (табл.2.6). Негативні значення енергій Гіббса вказують на можливість самовільного утворення пероксиду водню. Разом з тим, за даними долідників, основним реагентом, що бере участь у формуванні пероксиду водню, вважається гідродіоксил-радикал (Y.B. Xie, C.-J. Liu, 2008). Цей радикал утворює комплекс з водою, що полегшує процес утворення пероксиду водню:



Гідродіоксил-радикал має властивості слабкої кислоти і утворює при дисоціації супероксид іон-радикал:



При підвищенні  $pH$  даний іон-радикал вступає в хімічні перетворення з утворенням у результаті пероксиду водню:



За значеннями константи дисоціації  $HO_2$  розраховано розподілення молекулярних та іонних форм радикалів за різних значень  $pH$  розчинів (рис. 2.7).

Як видно з отриманих даних, до  $pH = 4$  превалюючою формою радикалів є  $HO_2$  (не менше 90 %) і основний внесок в утворення гідроген пероксиду направляють реакції (1.20) – (1.22). При  $pH > 6$  ситуація істотно змінюється. У цьому випадку переважає іонна форма радикалів  $O_2^{\cdot -}$  і протікають реакції (1.24) – (1.26). У діапазоні  $pH$  між 4 та 6 кількостями молекулярної та іонної форм радикалів порівнянні і можуть одночасно реалізовуватися обидва механізми формування гідроген пероксиду. На підставі термодинамічних даних, були розраховані теплові ефекти реакцій утворення поліоксидів водню (Levanova et.al., 2016), а для оцінки ймовірності їх перебігу – вільні енергії Гіббса (табл. 2.7).

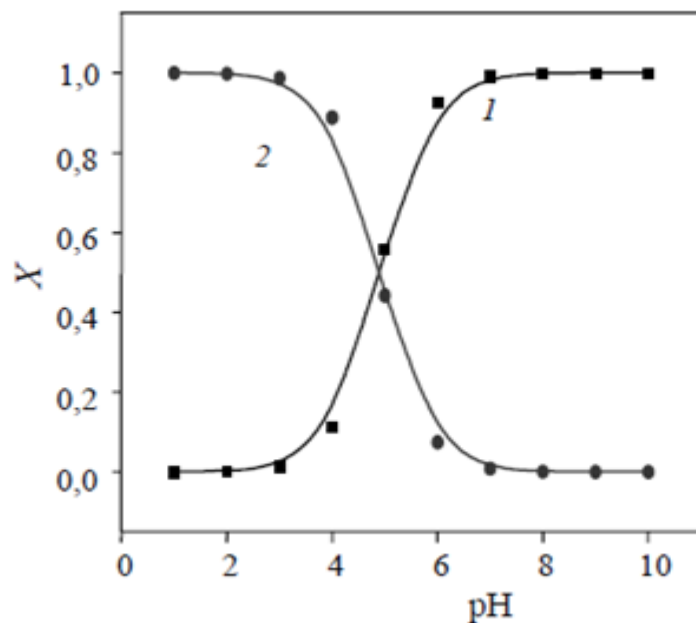


Рис. 2.7. Розподіл іонної  $O_2^{\cdot -}$  (1) та молекулярної  $HO_2$  (2) форм радикалів  $X$  за різних значень  $pH$  розчинів

Як свідчать дані, процес утворення поліоксидів водню протікає з виділенням тепла, кількість якого збільшується зі зростанням числа атомів кисню в молекулі. Так як у всіх випадках отримано негативну зміну вільної енергії Гіббса, то це вказує на протікання процесів полімеризації пероксиду водню у водних розчинах з утворенням поліоксидів водню різного складу. Вирогідно, що збільшення кількості атомів кисню в молекулі полімеру приводить до деяких кінетичних ускладнень в процесі полімеризації, які пов'язані зі зростанням стеричних полімерних форм і ентропійної складової.

Для оцінки достовірності результатів, отриманих термодинамічним методом, проведені експериментальні дослідження (Пивоваров, Тищенко, 2006).

Таблиця 2.7. Тепловий ефект і вільна енергія Гіббса реакцій утворення поліоксидів водню за температури 298 К

Реакція	$\Delta H^\circ$ , кДж/моль	$\Delta G^\circ$ , кДж/моль
$2H_2O_2 \rightarrow HO_3H + H_2O$	-4,1	-122,83
$3H_2O_2 \rightarrow HO_4H + 2H_2O$	-55,34	-192,74
$4H_2O_2 \rightarrow HO_5H + 3H_2O$	-102,8	-258,87
$5H_2O_2 \rightarrow HO_6H + 4H_2O$	-156,65	-331,92
$6H_2O_2 \rightarrow HO_7H + 5H_2O$	-196,75	-390,16
$7H_2O_2 \rightarrow HO_8H + 6H_2O$	-248,80	-460,88
$8H_2O_2 \rightarrow HO_9H + 7H_2O$	-295,34	-526,09
$9H_2O_2 \rightarrow HO_{10}H + 8H_2O$	-347,51	-596,93

## 2.5. Взаємозв'язок енергетики плазмового розряду з хімічним складом рідкого катода

Із літературних джерел відомо (Князев, 2003; Пивоваров, Тищенко, 2006), що умова самопідтримки плазмового розряду описується нерівністю

$$\gamma(e^{ad} - 1) \geq 1, \quad (2.67)$$

де  $\gamma$  – таунсендівський коефіцієнт іонно-електронної емісії, причому

$$\gamma = j_- / j_+, \quad j_- + j_+ = j_0, \quad (2.68)$$

$j_-, j_+, j_0$  – електронна, іонна і повна щільність струму, на межі катод–розряд;

$\alpha$  – таунсендівський коефіцієнт розмноження електронів у газі;

$d$  – товщина катодного шару.

Розглянемо прирозрядну область водного розчину (рис. 2.8). Іони, що прискорюються в катодній області розряду в напрямку катода, проникають в електроліт на глибину  $\leq D$ . Середня швидкість утворення надмірних електронів в одиниці прирозрядного об'єму глибиною  $D$  визначається щільністю іонного струму  $j_+$ , величиною «електрорадіаційного» виходу електронів  $y_e$  на один іон та об'ємною швидкістю зникнення електронів за рахунок захоплення акцепторами і дірками

$$W_- = \frac{y_e j_+}{D} - W_{\text{зник}}, \quad (2.69)$$

де  $W_{\text{зник}}$  – об'ємна швидкість зникнення електронів за рахунок захоплення.

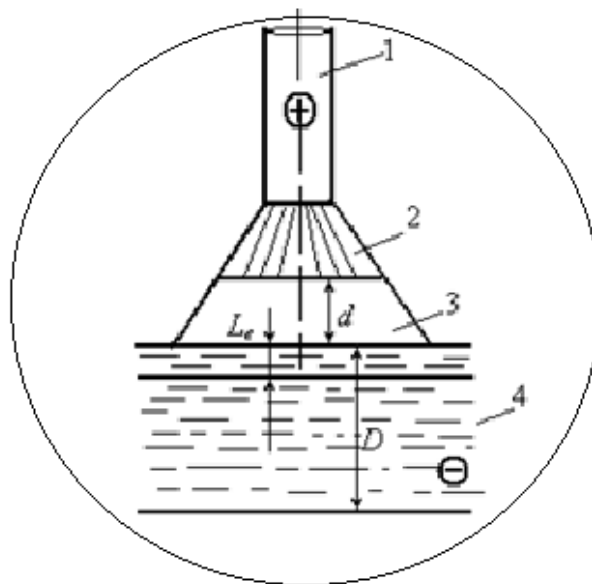


Рис. 2.8. Розряд з електролітним катодом:

- 1 – анод; 2 – область позитивного стовпа розряду; 3 – катодний шар розряду; 4 – водний розчин електроліту

Прийmemo, що ефективний параметр глибини виходу електронів у газ  $Le < D$ . Тоді щільність електронного струму в розряді  $j_- = L_e [(y_e j_+ / D) - W_{зник}]$ . Звідси отримуємо щільність

$$j_0 \geq \frac{L_e W_{зник} \cdot e^{\alpha d}}{\frac{L_e y_e}{D} \cdot (e^{\alpha d} - 1) - 1}. \quad (2.70)$$

З нерівності (2.70) виходить, що для формування контактного плазмового розряду необхідно підтримувати катодну щільність струму розряду вище певного рівня.

При цьому збільшення швидкості зникнення електронів у розчині  $W_{зник}$  або зменшення виходу електронів  $y_e$  вимагає збільшення граничної щільності струму. Підвищення катодної щільності струму пов'язане зі збільшенням напруженості електричного поля в катодному шарі, що приводить до зростання середньої енергії прискорюваних в напрямку катода позитивних іонів. Таким чином, хімічний склад водного розчину визначає як катодну щільність струму плазмового розряду, так і напруженість електричного поля в катодному шарі. Від напруженості залежить, у свою чергу, енергія іонів, що впроваджується в електроліт, і енергія електронів, що прискорюється в плазмовому розряді в напрямку анода. Наявність сильних акцепторів надмірного електрона в розчині повинна приводити до підвищення енергії електронів плазмового розряду і, можливо, стінки анода, що знаходиться в газовій фазі. Певним чином оцінюється й щільність струмів іонно-електронної емісії електрорадіаційного типу (Баковец и др., 1991). Прийнято мультиплікативне вираження для щільності струмів електронної емісії з розчину

$$j_- = a P L_e, \quad (2.71)$$

де  $a$  – коефіцієнт ефективності переходу електронів, що досягли межі розділу електроліт-газ, через цей кордон, причому  $a \approx 1$ ;

$P$  – об'ємна швидкість народження електронів з необхідною енергією для переходу з розчину в газ;

$L_e$  – ефективний параметр глибини виходу електронів з розчину в газ (4,0 нм за незначної ролі процесів захоплення і розсіяння електронів на іонах розчину).

Величина  $L_e$  повинна зменшитися за рахунок захоплення електронів акцепторами і гальмування їх у полі розчинених іонів. Водночас, будучи тісно пов'язаною з довжиною термалізації електрона, величина  $L_e$  повинна помітно зростати в області проникнення сильного електричного поля плазмового розряду в розчин. Кількісний облік цих чинників вимагає знання абсолютних величин перерізів захоплення електронів акцепторами, розсіяння їх на іонах і розподілу напруженості поля в прирозрядній області розчину. Проте такі дані уривчасті і недостатні для кількісного описання процесу.

Об'ємну швидкість народження електронів, здатних покинути розчин, можна приблизно вважати рівною:

$$P = \frac{y_e J_+}{D} \cdot x, \quad (2.71)$$

де  $x$  – частка електронів, що народжуються з енергією, необхідною для того, щоб покинути розчин. Для оцінки  $x$  приймають, що розчинник можуть покинути електрони з початковою енергією  $\varepsilon_n$ , глибини зони провідності  $U_{sv}$ , що перевищує суму, 1,25 еВ і поверхневого стрибка потенціалу  $\chi = 0,13$  еВ, тобто  $\varepsilon_n \approx 1,4$  еВ. Народжувані в результаті контактної дії нерівноважної плазми електрони, що покинули поле «материнського» іона, розподілені по енергіях в інтервалі  $\varepsilon_n$  від  $\varepsilon^* \approx 5$  еВ до  $kT$  згідно зі законом (Райцимринг, Цветков, 1980)

$$P(\varepsilon_n) = \frac{8}{3} \cdot \frac{(e^*)^2}{(e^* + \varepsilon_n)^3} \cdot \quad (2.72)$$

Звідси знаходимо долю електронів, здатних покинути розчинник,

$$x = \int_{\varepsilon_n=1,4\text{эВ}}^{e^*} \frac{(e^*)^2}{(e^* + \varepsilon_n)^3} \cdot d\varepsilon_n / \int_{kT}^{e^*} \frac{(e^*)^2}{(e^* + \varepsilon_n)^3} \cdot d\varepsilon_n \approx 0,48. \quad (2.73)$$

Глибина проникнення іонів, очевидно, має бути порівнянна з оцінним значенням середнього радіусу шпор (8,0–10,0 нм). Оцінки для глибини проник-



нення, наприклад, іонів  $H^+$  з кінетичною енергією  $\varepsilon = 100$  еВ у воду, дають величину  $D = 17,0$  нм, що задовільно узгоджується з цим значенням. Величину «електрорадіаційного» виходу  $y_e$  розумно прийняти рівною 3,5 частки на іон. Таким чином, щільність струму електронної емісії може бути визначено за рівнянням

$$y_e \frac{j_+}{D} \cdot xL_e \approx 0,4 \cdot j_+ . \quad (2.74)$$

Відношення  $\gamma_+ = j_-/j_+ = 0,4$  може бути прийнято як верхня межа коефіцієнта  $\gamma_k$  іонно-електронної кінетичної емісії електрорадіаційного типу. Таке співвідношення струмів є цілком достатнім для самопідтримки плазмового розряду. Зниження цієї величини на 1–4 порядки при зростанні ролі процесу захоплення і розсіяння електронів на іонах не повинне порушити умов стабільності розряду ( $\gamma_{пред} \approx 10^{-5}$ ).

Проаналізуємо додаткові фактори, що впливають на характер плазмового розряду з електролітним катодом за фіксованого тиску.

Падіння напруги на розряді складається з падіння напруги у водному катоді і в газовому проміжку. Розглянемо розряди під час сталого режиму обробки. У діапазоні струму 50–200 мА напруга монотонно зростаюча. При цьому характеристики при обробці розбавлених водних розчинів і дистильованої води мало відрізняються між собою. Однак при зміні сили струму змінюється характер нагріву металевго анода (рис. 2.9).

Встановлено, що динаміка зміни виду розряду і характерні зміни на аноді пов'язані з нагріванням у результаті горіння розряду. Зміну сили струму плавно проводили в процесі обробки розчинів під час безперервної зйомки. Наведено кадри, що фіксують зміни сили струму з кроком 25 мА. У результаті теплообміну між розрядним простором і охолоджуваними стінками реактора відбувається швидке охолодження металевго електрода при зменшенні сили струму до 75–50 мА.

За встановленого режиму обробки (режим, коли отримано достатню кількість заряджених часток для підтримки нормального розряду – рис.2.9, спосте-

рігається зміна геометрії катодної плями, пов'язаної з перенесенням заряджених часток бульбашками водню, мікроспалахів під поверхнею і на поверхні рідини (Сергеева, Пивоваров, 2015). Характер подібних змін зображено на рис. 2.10.

У час переходу до обробки розчинів при силі струму  $I > 125$  мА відзначається поява мікророзрядів у газових бульбашках, що піднімаються з металевого катода, заглибленого в рідину. На рис. 2.10, 2.11 показано динаміку переносу заряджених бульбашок до поверхні рідини, їх прохід через поверхню розділу фаз рідина – газ і перехід у газову фазу.

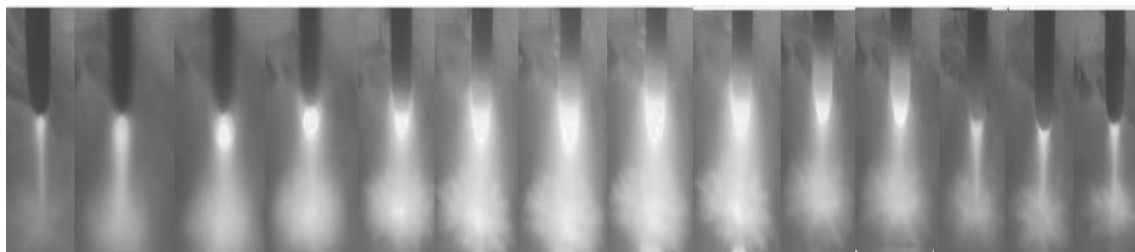


Рис. 2.9. Динаміка зміни розряду при зміні сили струму від 50 до 200 мА і назад; крок 25 мА. Рідина – розчин  $CuSO_4$  (0,25 г/л) у дистильованій воді

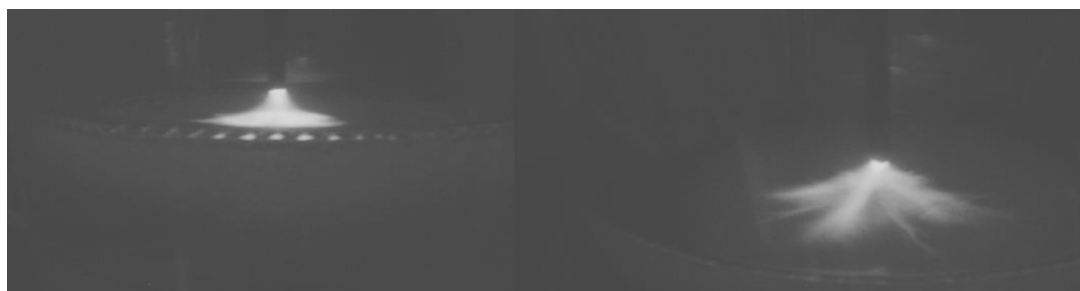


Рис. 2.10. Розряд за сталого режиму. Вид під кутом  $10^\circ$  до поверхні рідини. Вид під кутом  $45^\circ$  до поверхні рідини

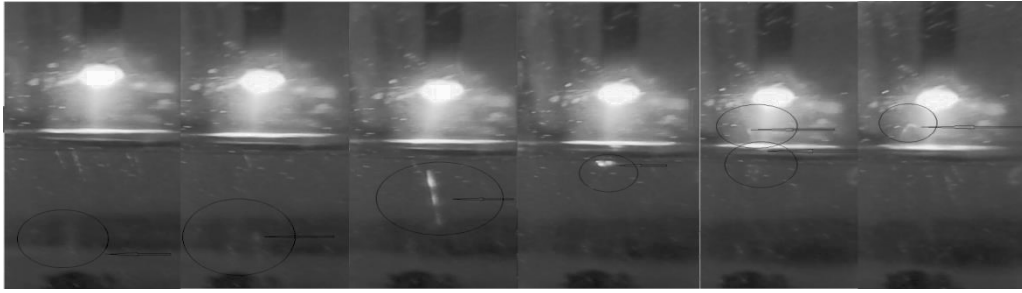


Рис. 2.11. Динаміка переносу заряджених бульбашок водню від металевго катода до металевго анода. Обробка розчину  $CuSO_4$  (0,25 г/л) у дистильованій воді. Швидкість зйомки 20 кадрів на секунду

Стрілками відзначено поведінку обраної для спостереження бульбашки. Явища, пов'язані з перенесенням заряджених частинок бульбашками газу, мікропалахів під поверхнею і на поверхні рідини можуть бути додатковими факторами, які слід урахувувати при складанні математичних моделей, що описують процес плазмохімічної обробки розбавлених водних розчинів.

У дослідженнях (Коробейников и др., 2002) проведено зіставлення періодів «пробою» за відсутності бульбашок та в їх наявності і зроблено висновок про те, що бульбашки зменшують час «пробою», тобто сприяють запалюванню розряду. Виконаний аналіз експериментальних даних і моделей іонізаційних процесів у бульбашці дозволяє зробити висновок про те, що «пробій» катодних бульбашок відбувався за «лавинним» механізмом (Бутырина и др., 2013). Відповідно до даних, отриманих колективом дослідників (Коробейников и др., 2001), залежність швидкості спливання газових бульбашок від щільності струму є лінійною і описується рівнянням:

$$W = -18,4 \times 10^{-4} + 1,28 \times 10^{-5} \cdot I, \quad (2.81)$$

де  $W$  – швидкість спливання бульбашки, м/с;

$I$  – катодна щільність струму, А/дм<sup>2</sup>.

Швидкість спливання газової бульбашки прямо пропорціональна катодній щільності струму. У роботі (Коробейникова зі співавторами, 2002) визначено мінімальну щільність струму ( $I = 41$  А/дм<sup>2</sup>), при якій може сформуватися га-

зова бульбашка певного розміру, коли сила виштовхування буде дорівнювати силі прилипання, що дасть йому можливість відірватися від катодної поверхні. Зазначено також, що кількість газових бульбашок обернено пропорційна щільності струму, а швидкість їх спливання прямо пропорційна навантаженню струму, що задається. У процесі обробки розчину на металевому катоді в результаті розкладу води утворюється газ (водень) – рис. 2.12. В умовах зниженого тиску, сили струму порядку 130 мА і напруги 500 В мають місце:

- 1) утворення бульбашок на катоді;
- 2) відбувається випадковий момент початку зростання;
- 3) при відриві від поверхні електрода на початковій стадії бульбашки продовжуються уздовж поля, зменшуючись в поперечному напрямку, та набувають характерної витягнутої форми.

Стиснення бульбашки означає, що вона поводить себе як діелектрик, поле всередині нього неспотворене або слабо спотворене. Швидкість спливання бульбашки, з огляду на знімки, становить 0,15–0,2 м/с. Якщо виходити з виду деформації, то витягнута форма катодних бульбашок указує на отримання імпульсу всією верхівкою бульбашки. Це може статися в результаті набуття заряду поверхнею і дії кулонівської сили на заряд. У свою чергу поверхневий заряд може з'явитися в результаті об'ємного розряду. Надалі можливе виникнення нестійкості зарядженого шару, яка призводить до зміни профілю границі. Напруженість поля в більш опуклих точках посилюється, що сприяє ще більшому їх витягуванню. Оцінки напруженості, необхідної для руху локальних заряджених областей, з міркувань (Королев, Месяц, 1991)

$$\varepsilon_0 \varepsilon E^2 \sim \rho W^2, \quad (2.82)$$

де  $\rho$  – густина рідини, г/см<sup>3</sup>;

$W$  – швидкість спливання бульбашки, м/с.

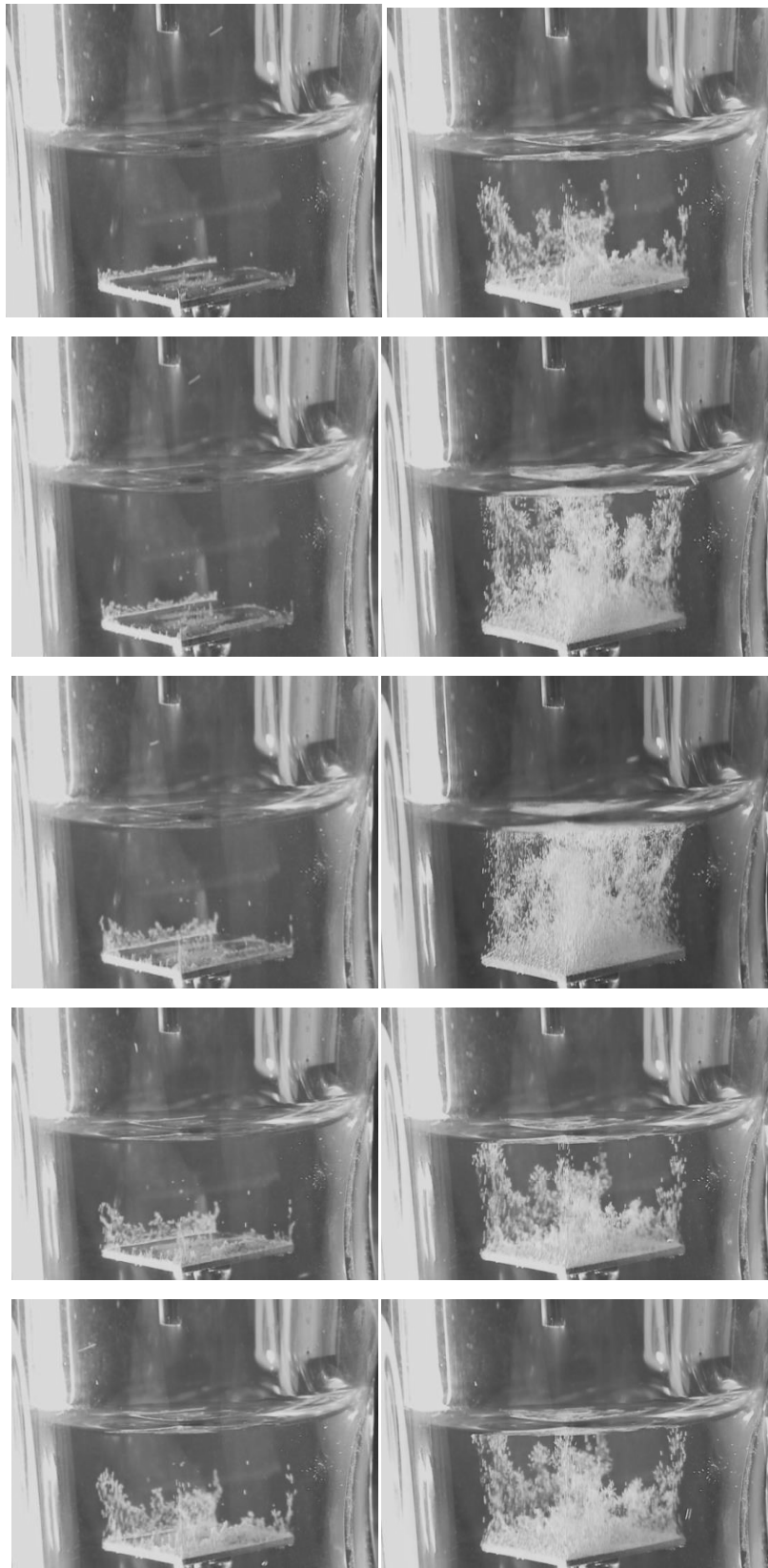


Рис. 2.12. Процес утворення газових бульбашок на катоді під час дії КНП

У результаті пересичення приповерхневого шару молекулами розчиненого газу відбувається поступове зростання газового пухирця і його перетворення з плоского у сферичний. Бульбашка, що сформувалася, відривається від поверхні катода під дією електричного поля і виштовхувальної сили (рис. 2.13). Кількість водню, що утворюється на катоді, визначається законом Фарадея і залежить від кількості електричного струму, який пройшов через систему електрики і матеріал електрода. Перенапруження розряду іонів водню на нержавіючій сталі мале, до того ж у використовуваному розчині відсутні іони, здатні розряджати на катоді паралельно з воднем, тому вважаємо, що водень розряджається зі 100 %-вим виходом по струму.

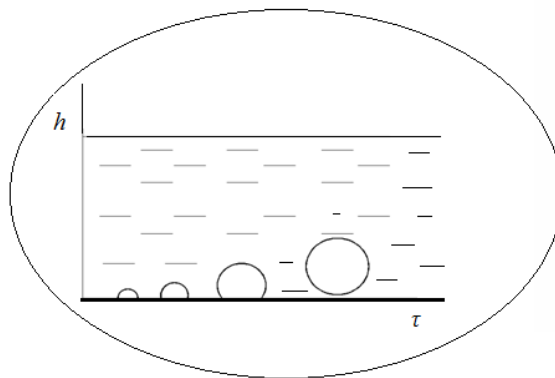


Рис. 2.13. Схема зростання газового міхура на поверхні катода

$$N = 6,87 \times 10^{18} / i^{4,4}. \quad (2.83)$$

На підставі отриманих даних про залежність середнього розміру газового пухирця від щільності струму  $i$ , припустивши, що пухирець, який відірвався від катодної поверхні, має сферичну форму, визначили залежність кількості газових бульбашок від густини струму (рис. 2.14,а).

Якщо піддати логарифмуванню отриману залежність, то можливо провести пряму в координатах  $\ln N - \ln i$  (рис. 2.14,б), обробивши яку, записати рівняння залежності кількості бульбашок від щільності струму; з ростом густини струму зменшується кількість бульбашок водню, що утворюється. Швидкість спливан-

ня газових бульбашок залежить від їх розміру, обумовленого щільністю струму, і може бути розрахована за формулою Стокса:

$$W = d^2 \cdot g \cdot \Delta\rho / 18\mu, \quad (2.84)$$

де  $d$  – діаметр газового пухирця, м;

$g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;

$\Delta\rho$  – різниця густин рідкої і газової фаз, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – динамічна в'язкість рідкої фази, Па·с.

Швидкість спливання газового пухирця прямо пропорційна катодній щільності струму.

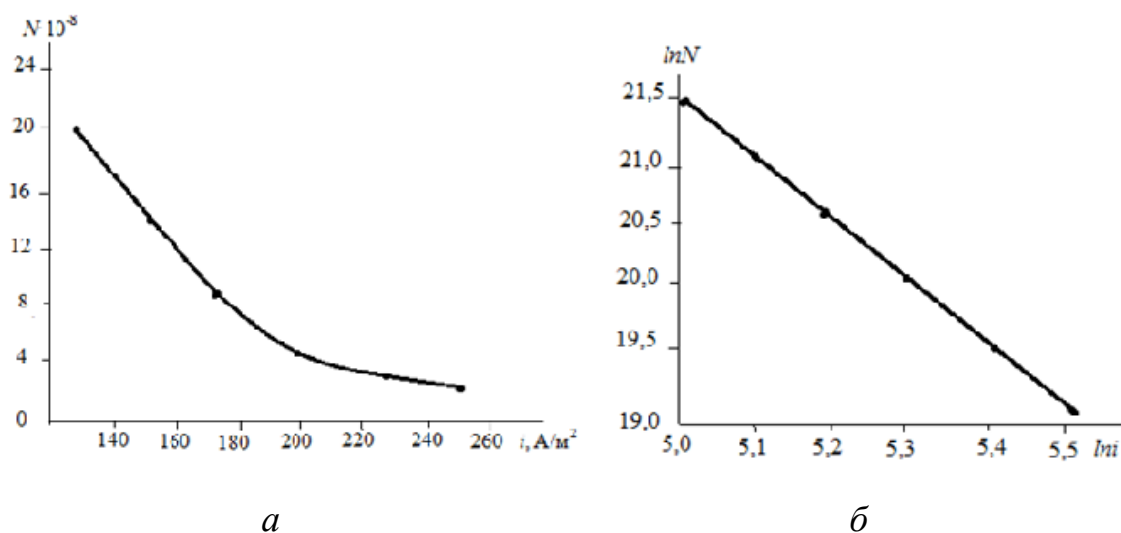


Рис. 2.14. Залежність кількості газових бульбашок  $H_2$ :  $a$  – від щільності струму;  $b$  – від щільності струму в логарифмічних координатах

Очевидно, що існує мінімальна щільність струму, за якої може сформуватися газовий пухирець певного розміру; сила виштовхування його дорівнюватиме силі прилипання, що дасть йому можливість відірватися від катодної поверхні. З рівняння (2.83) випливає, що мінімальне значення щільності струму  $i = 141$  А/дм<sup>2</sup>.

З ростом густини струму зменшується кількість бульбашок водню. Залежність швидкості спливання газових бульбашок лінійна і описується рівнянням:

$$W = -18 \cdot 10^{-4} + 1,28 \cdot 10^{-5} i . \quad (2.85)$$

Роль водневих пухирців у процесі формування нерівноважної плазми є значною, бо саме завдяки їх наявності на поверхні рідини утворюється велика кількість кавітаційних сплесків з формуванням голкоподібних водних піків, з яких електрони мають можливість рухатися до анода, сприяючи іонізації газового простору. Таким чином, на підставі експериментальних даних, а також результатів їх математичної обробки отримано рівняння залежності кількості бульбашок і швидкості їх спливання від катодної щільності струму.

## 2.6. Висновки

В сучасному науковому світі стають привабливими технологічні процеси, які засновані на використанні низькотемпературної нерівноважної плазми як інструмента для обробки води та водних розчинів. Коронний, тихий, бар'єрний, тліючий розряди на поверхні та в об'ємі рідини створюють унікальні умови для широкого кола хімічних перетворень з утворенням розчинів з принципово новими властивостями. Окиснювальні та відновлювальні процеси в реагуючій рідинній системі дозволяють змінювати фізико-хімічні показники кінцевого продукту, що призводить до отримання водних розчинів з особливими властивостями, які можуть відігравати важливу роль в медицині, агропромисловості, хімічній галузі та багатьох інших сферах господарства. Теоретичне обґрунтування і практична реалізація плазмохімічних процесів дозволили сформувати напрямки їх застосування в новітніх технологіях замість застарілих, побудованих на багатостадійності та з використанням методів і засобів традиційної хімії. Показано науковий та практичний потенціал застосування контактної нерівноважної плазми в різноманітних технологіях з отриманням унікальних продуктів і їх подальшому використанні для підвищення якості і стандартів сучасного життя.



## **Розділ 3. ЗАСТОСУВАННЯ ОБРОБЛЕНОЇ ПЛАЗМОЮ ВОДИ В ХЛІБОПЕЧЕННІ В КОНТЕКСТІ ПРОДОВОЛЬЧОЇ БЕЗПЕКИ**

### **3.1. Продовольча безпека: аспекти раціонального використання продовольчої сировини**

Продовольча проблема є однією з ключових у забезпеченні добробуту і здоров'я населення. Наявність харчової продукції у достатній кількості і високій якості є викликом для сучасності внаслідок обмеженості ресурсів. Застосування системного підходу до зниження втрат продовольчої сировини виступає одним із найбільш пріоритетних завдань сьогодення.

Продовольча безпека, як забезпечення населення високоякісною продукцією харчування, є однією з основних проблем людства. Виробництво продуктів харчування повинно суттєво збільшуватися, щоб задовольнити майбутні потреби зростаючого населення, яке за прогнозами Всесвітньої продовольчої організації (FAO) до 2050 року становитиме понад 9 млрд. (Xiaolei et al., 2013). Щоб забезпечити населення продуктами харчування, треба не лише збільшувати обсяги вирощування рослинної і тваринної продукції, а й підвищувати ефективність використання продовольчої сировини, застосовуючи безвідходні технології її переробки. При цьому має зберігатися умова отримання продукції високої якості і безпечності для кінцевого споживача.

Результати дослідження, проведені FAO, показують, що приблизно одна третина харчової сировини і готових продуктів, що виробляються для споживання людей, втрачається. Тобто щороку втрати харчової сировини сягають 1,3 млрд тонн. При цьому у перерахунку на сухі речовини 44 % сільськогосподарських культур, зібраних у полі, не доходять до столу споживача (Korotkov et al., 2010; Garvey et al., 2013). Величезна кількість харчових втрат у глобальних ланцюгах харчування привертає все більшу увагу суспільства через екологічні, соціальні та економічні наслідки їх наявності на планеті. Величезна кількість ресурсів, що використовуються у виробництві продуктів харчування, витрача-

ється даремно. Зокрема, викиди парникових газів, спричинені виробництвом продуктів, які в кінці кінців не застосовуються для харчування людини, також є марними.

Питаннями зниження втрат продовольчої сировини сьогодні найбільше опікуються науковці Великої Британії, США, Швеції, Німеччини, Фінляндії, Китаю, Нідерландів, Індії, Австрії і Австралії (Pivovarov et al., 2015). Дані про зміну клімату переконують, що виробництво і споживання харчових продуктів суттєво впливає і на глобальне потепління. Адже доведено, що для країн Європейського Союзу їх вклад становить 22 % факторів, які призводять до кліматичних змін (Murielle et al., 2010).

Втрати продовольчої сировини відбуваються на кожному етапі протягом усього харчового ланцюга, який являє собою послідовність стадій і певних операцій виготовлення, обробки, розподілу, зберігання харчових продуктів та їхніх інгредієнтів і користування ними, починаючи з первинного виробництва і до споживання (Верголяс, Гончарук, 2016). Окремо вирізняють дві категорії втрат: втрати харчових продуктів – зменшення їх кількості і якості та харчові відходи як частину втрати харчових продуктів, які зіпсувалися з вини учасників продовольчого ланцюга, переважно кінцевого споживача. Отже, значної кількості втрат продовольчої сировини, а саме понад 80 %, можна уникнути. Звісно, що у харчовому ланцюзі неможливим є повне використання всієї сировини рослинного і тваринного походження та готової харчової продукції, але частка таких втрат незначна і становить лише 18 %.

Харчовий ланцюг складається із шести основних ланок: вирощування сільськогосподарської продукції та її збирання; післязбиральна обробка і зберігання; переробка і виробництво готової до споживання харчової продукції; постачання харчових продуктів суб'єктам роздрібної торгівлі; реалізація товару кінцевому споживачу; споживання. Проте наповнення продовольчого ланцюга за етапами може варіюватися залежно від товарної групи харчових продуктів.

Агропромисловий сектор, який включає сільське господарство, харчову та переробну промисловість, займає одне з найважливіших місць у структурі

української економіки. Сільськогосподарське виробництво формує близько 10 % українського ВВП, у той час як харчова промисловість – близько 8 %. Зазначені галузі зі сільськогосподарським машинобудуванням, виробництвом добрив і хімікатів складають у ВВП України понад 25 % (Martínez-Huitle, Brillas, 2008; Malik, 2010; Масленников и др., 2013). За даними вчених, якщо у США до роздрібного покупця може доходити 90 % вирощеної продукції, в Україні – близько 40 % (Huang et al., 2008). Тільки в збиральний період втрати плодоовочевої продукції в Україні становлять майже 43 % загального обсягу виробництва. Таким чином втрати харчової продукції є важливою проблемою як для світової спільноти, так і для української економіки, що потребує пошуку шляхів скорочення втрат із впровадження ресурсозберігаючих технологій.

Втрати харчової сировини суттєво залежать від її хімічного складу та застосовуваних технологічних переробок і виробництва кінцевого харчового продукту. Наприклад, для олійних і бобових культур та м'яса втрати становлять 20 %, того часу для коренеплодів і плодоовочевої продукції втрачається близько 45 % від кількості харчової сировини на початку продовольчого ланцюга.

Харчові товарні групи відрізняються за характером і кількістю продовольчих втрат. У цілому прийнято поділяти їх на такі продовольчі групи (Pivovarov et al., 2015): зерно і зернові продукти; коренеплоди; олійні і бобові культури; плоди; овочі; м'ясо; риба і морепродукти; молочні продукти; яйця; інші види харчових продуктів.

Незважаючи на особливості товарних груп під час урахування втрат сировини в диференційованих харчових ланцюгах деякі групи об'єднують, наприклад, плоди та овочі, молочні продукти і яйця. У табл. 3.1. наведені втрати продовольчої сировини в період від сільськогосподарського виробництва – кінцевий етап харчового ланцюга – споживання готової харчової продукції. Для європейських країн у цілому найбільша кількість втрат характерна для початкової точки ланцюга постачання (коренеплоди, олійні і бобові культури, плоди та овочі) і кінцевої точки (зернові культури, м'ясо, риба і морепродукти, молоко і яйця). На етапі постачання харчових продуктів реєструються найменші

втрати. Виняток становить плодоовочева продукція через зниження її якості під час транспортування. Для більшості товарних груп рослинного походження, тобто зерна і зернових продуктів, коренеплодів, олійних і бобових культур, а також м'яса, значна частка харчової сировини втрачається під час переробки і пакування. Так для зерна кількість втрат, що виникають у післязбиральний період, під час зберігання і в технологічних процесах його переробки, перевищують аналогічні втрати зерна в полі у 2 та 4 рази, відповідно.

Таблиця 3.1. Втрати сировини протягом харчового ланцюга «з лану до столу» в Європі (Pelletier et al., 2013)

Вид харчової сировини	Втрати протягом ланки продовольчого ланцюга, млн т					Загальні втрати, %
	сільсько-господарське виробництво	післязбиральна обробка і зберігання	переробка і пакування	постачання	споживання	
Зерно і зернові продукти	2,8	4,9	10,8	1,8	22,6	30
Коренеплоди	26,9	9,2	7,0	2,1	6,7	45
Олійні і бобові культури	1,7	0,2	0,7	0,2	0,6	20
Плоди та овочі	32,0	6,3	1,8	6,6	21,2	45
М'ясо	1,8	0,4	2,8	2,1	5,7	20
Риба і морепродукти	0,6	0	0,4	0,4	0,7	35
Молочні продукти і яйця	8,2	1,1	2,0	1,0	11,9	20
Всього	74	22	26	14	69	-

Як бачимо з наведених даних, втрати продовольчої сировини відбуваються на всіх етапах харчового ланцюга. Проте залежно від продовольчої групи доцільно вибирати різні концептуальні підходи, щоб скоротити втрати. Для коренеплодів, плодоовочевої продукції, олійних і бобових культур важливо запобігти втратам на початкових етапах харчового ланцюга. Більша кількість сировини тваринного походження має найбільші втрати на етапі споживання продукції. Зниження таких втрат у першу чергу пов'язано з раціоналізацією культури харчування і самосвідомістю споживачів. Увагу привертають можливості зміни технологічних підходів до первинної обробки, зберігання та переробки зерна,

коренеплодів, олійних і бобових культур та м'яса за рахунок використання ресурсозберігаючих методів обробки сировини. Такі технологічні етапи забезпечують приблизно 24 % усіх втрат протягом харчового ланцюга. Розвиток технологій на даних етапах здатний сприятливо впливати і на кінцеву стадію продовольчого ланцюга – споживання – за рахунок впровадження технологій виробництва харчових продуктів, які дозволяють забезпечити подовжений термін зберігання споживчих якостей харчових продуктів.

Розглянемо деталізацію втрат харчової сировини на трьох початкових етапах продовольчого ланцюга, які належать до безпосередньої сфери агропромислового комплексу (табл. 3.2).

Продовольча сировина втрачається уздовж усього харчового ланцюга – від вирощування культур сільськогосподарського призначення до споживання кінцевого харчового продукту. При цьому відомий факт залежності продовольчих втрат від рівня економічного розвитку країн.

Таблиця 3.2. Втрати протягом продовольчого ланцюга на ділянці вирощування та виробництва харчової продукції (Murielle et al., 2010).

Стадія	Харчові втрати, що виявляються на ділянці харчового ланцюга
1	2
Вирощування	Харчові культури, що були залишені у полі, з'їдені птахами, гризунами; недотримання термінів збору врожаю і втрата якості сільськогосподарської сировини; пошкодження врожаю під час заготівлі; недостатньо високий рівень агротехніки
Первинна обробка в полі	Втрати, пов'язані зі зниженою ефективністю роботи обладнання
Сушіння–транспортування	Втрати під час транспортування; псування і травмування
Зберігання	Пошкодження шкідниками, хворобами; втрати внаслідок забруднення сільськогосподарської сировини; проливання, просипання; природні втрати внаслідок фізіологічних процесів і висихання сировини

Продовження табл. 3.2

1	2
Первинна переробка – очищення, калібрування, сушіння, шліфування, пакування, замочування, просіювання	Технологічні втрати пов'язані із недосконалістю організації виробничих процесів; забруднення сировини, що призводить до втрати якості
Вторинна переробка – змішування, формування, нарізання, термічна обробка, виробництво кінцевої продукції	Технологічні втрати, пов'язані з недосконалістю організації виробничих процесів; забруднення сировини, що призводить до втрати якості
Оцінка продукту – контроль якості: стандарти, рецептурний склад	Втрати продукту через невідповідність вимогам стандартів; застосування руйнівних методів контролю
Упаковка – зважування, маркування, герметизація	Неприпустимий вміст виробленої упаковки продукту; втрати зерна за безтарного зберігання внаслідок атаки гризунів

Причини втрати харчових продуктів у країнах зі середнім і високим рівнем доходів головним чином пов'язані з поведінкою споживачів, а також з відсутністю координації між різними учасниками продовольчого ланцюга. Продовольчі відходи в промислово розвинених країнах можуть бути зменшені шляхом підвищення обізнаності серед працівників харчової промисловості, роздрібної торгівлі і підвищення культури споживання харчових продуктів. Сьогодні актуальною є також проблема повного використання побічних продуктів харчової промисловості для створення якісної і максимально корисної продукції. До групи продовольчих відходів входять втрати харчових продуктів, які потенційно можуть бути використані для споживання людиною (Xiaolei et al., 2013). Наприклад, під час переробки зерна пшениці на борошно середні втрати становлять 20 % за масою вхідної сировини (Martínez-Huitle, Brillas, 2008). Ці втрати являють собою в основному побічні продукти, до яких відносять кормові зернопродукти і висівки, що містять зародок, і периферійні частини зернівки, багаті на біологічно активні речовини і харчові волокна (табл. 3.3). Зокрема, на більшості українських харчових підприємств потенціал корисності пшеничних зародків часто не розкривається для кінцевого споживача через недостатню

практику подальшої переробки цього побічного продукту (Abdulsudi et al., 2011). Тому це спричиняє вилучення цінного для людини зародка з продовольчого ланцюга внаслідок швидкого псування, зумовленого розвитком окислювальних процесів. Але прогалини в оптимізації використання продовольчої сировини носять не регіональний, а світовий характер, що вказує на необхідність наукового пошуку вирішення даного питання.

Харчова промисловість відіграє надзвичайно важливу роль у забезпеченні продовольчої безпеки. Зниження втрат продовольчої сировини є важливим кроком до підвищення ефективності використання природних ресурсів. Однак потрібно мати збалансований підхід до мінімізації енергетичних витрат у технологічному процесі поряд із необхідністю створювати «здорові» продукти харчування з високою харчовою і біологічною цінністю (Mykolenko et al., 2014).

Тенденції до зростання кількості населення і збільшення антропогенного навантаження на навколишнє середовище у XXI столітті вказують на те, що для виробництва сільськогосподарської і харчової продукції ми змушені використовувати менше матеріальних і енергетичних ресурсів. У свою чергу обсяги виробництва будуть зростати, що потребує розробки новітніх харчових продуктів і впровадження інноваційних технологічних рішень у харчову і переробну промисловість.

До основних напрямів інноваційної діяльності у харчовій і переробній галузях належать:

- технологічні (процесні);
- продуктові (асортиментні);
- маркетингові (управлінські);
- інфраструктурні (організаційні) (Misra et al., 2011).

Технологічні інновації здатні суттєво впливати на скорочення втрат продовольчої сировини. Вони можуть мати різну направленість. Передусім інновації можуть стосуватися розробки і впровадження нових технологій зберігання сировини, як основи для виробництва харчових продуктів. Звісно, що перспективним аспектом скороченням втрат є застосування ресурсозберігаючих техно-

логій, які характеризуються максимально високим виходом готової продукції широкого асортименту і мінімізацією відходів за рахунок застосування сучасних методів обробки харчової сировини.

Таблиця 3.3. Хімічний склад зерна і продуктів його переробки (Миколенко та ін., 2014).

Складові компоненти	Пшениця м'яка озима	Борошно пшеничне вищого сорту	Висівки пшеничні	Зародок пшеничний
Білки, г	11,2	10,3	16,0	23,1
Жири, г	2,1	1,1	3,8	9,7
Вуглеводи, г	55,2	68,9	16,6	38,6
Клітковина, г	2,4	0,1	43,6	13,2
Зольність, г	1,7	0,5	5,0	4,2
Na, мг	8,0	3,0	8,0	12,0
K, мг	323	122,0	126,	892,0
Ca, мг	50,0	19,0	150,0	39,0
Mg, мг	111	16,0	448,0	239,0
P, мг	340	86,0	950,0	842,0
Fe, мг	5,1	1,2	14,0	626,0
Zn, мг	2,8	-	7,27	12,3
Cu, мг	0,5	-	1,0	796,0
Mn, мг	108	16,0	11,5	13,3
Se, мг	0,3	-	0,7	79,2
B <sub>1</sub> , мг	0,41	0,17	0,75	1,9
B <sub>2</sub> , мг	0,17	0,04	0,26	0,5
B <sub>5</sub> , мг	1,15	-	2,2	2,2
B <sub>6</sub> , мг	0,5	-	1,3	1,3
B <sub>9</sub> , мг	0,4	-	0,1	0,3
E, мг	3,0	1,5	1,5	10,4
PP, мг	5,04	1,2	13,5	6,8

Необхідним є й пошук підходів до скорочення виробничого циклу без втрати якості готової продукції, а також впровадження нових технологій пакування продукції, що забезпечить їх високі транспортабельні якості.



Харчові продукти повинні максимально сприятливо впливати на здоров'я людини, мати тривалий термін зберігання споживчих якостей. Це також суттєво залежить від культури харчування і обізнаності людей щодо характеристик тих чи інших харчових продуктів. Для вирішення глобальної продовольчої проблеми необхідне впровадження інтегрованого багатогалузевого підходу вздовж всього ланцюга постачання харчових продуктів. Прийняття такого підходу дозволить досягти високої системної ефективності використання природних ресурсів, створення безпечних і якісних харчових продуктів широкого асортименту.

### **3.2. Використання плазмохімічно активованої води у хлібопеченні для підвищення якості продукції**

Хліб є одним з найважливіших продуктів харчування, який забезпечує організм людини вітамінами, мінералами, білковими речовинами та має високу енергетичну цінність. Однак виробництво хлібопекарської продукції прийнятної якості та мікробіологічної безпеки потребує використання борошна з високими хлібопекарськими властивостями, кількість якого на світовому ринку тенденційно знижується. Погіршення якісних характеристик пшеничного борошна останнім часом набуває непередбачуваного характеру. Основними чинниками такого явища є несприятливі кліматичні умови виробництва зернової продукції, недотримання агротехнічних заходів та технологічних особливостей зберігання та переробки зерна. Тому для коректування хлібопекарських властивостей борошна широкого розповсюдження в хлібопеченні набуло застосування поліпшувачів різного походження. Такі добавки можуть негативно впливати на здоров'я споживачів, особливо з огляду на те, що хлібобулочні вироби є продуктами масового вживання та присутні в щоденному раціоні людини. Наприклад, одним з ефективних хімічних поліпшувачів окислювальної дії є бромат калію, який в незначних дозах (0,001–0,003 %) за рахунок спрямованої дії на структурно-механічні властивості тіста сприяє підвищенню його газотримувальної здатності, збільшенню об'єму хліба, покращенню структури пористості й ко-

льору м'якушки. Довгий час бромат калію широко використовувався для виробництва хлібопекарської продукції, однак згодом було встановлено, що даний поліпшувач має канцерогенні ознаки, тому на сьогодні в багатьох країнах світу він заборонений до використання (Xiaolei et al., 2013). Водночас поліпшувачі мають достатньо високу вартість, а їх застосування в технології виробництва хлібобулочних виробів ускладнюється нестабільністю властивостей сировини й потребою в спеціальному дозувальному обладнанні, що робить неможливим їх використання в екстремальних умовах.

У зв'язку зі зростанням чисельності населення актуальною проблемою розвитку світу є забезпечення людей продуктами харчування. Поряд з тим значних масштабів останнім часом набуває підвищення рівня загроз техногенного характеру, кліматичних катаклізмів та терористичної активності за участю небезпечних для життєдіяльності речовин біологічного, хімічного та радіаційного походження. У разі виникнення згаданого «особливого» періоду вимоги до сировини, як правило, нівелюються за рахунок наявності будь-яких сировинних запасів, що зберігаються без ушкодження в реальних умовах та які мають використовуватися для виготовлення хлібопекарської продукції у великій кількості для масового забезпечення населення постраждалих територій. У такому випадку виникає проблема застосування сировини будь-якої якості для виготовлення хліба зі споживчими властивостями, що наближаються до відповідних стандартних характеристик. Вирішення подібних важливих завдань має реалізуватися шляхом технологій нового покоління, серед яких значну перспективу відіграють заходи, пов'язані з останніми досягненнями науки, зокрема в галузі хімії високих енергій (Korotkov et al., 2010; Garvey et al., 2013).

Необхідним компонентом в рецептурі хлібобулочних виробів є вода. Сьогодні в Україні та окремих країнах СНД хлібопекарські підприємства для виробництва продукції найчастіше використовують воду без будь-якої підготовки. Відомо, що від її структури і складу залежить інтенсивність мікробіологічних й ферментативних процесів під час приготування тіста та якість готового продукту. Використання води, яку піддано дії відомих фізико-хімічних методів, на-

приклад електролізу, ультрафіолетовому опромінюванню, озонуванню, не отримало широкого розповсюдження з багатьох причин, серед яких, відсутність серійного технологічного обладнання, вдосконалених технологічних регламентів та відповідного санітарно-гігієнічного тестування кінцевої продукції. Тому такі технологічні рішення до цього часу не вийшли за межі лабораторних досліджень.

Викликають зацікавленість процеси активації води за допомогою електричних розрядів, серед яких окремо виділяється застосування контактної нерівноважної плазми для обробки питної води та водних розчинів. Серед особливостей води, активованої під дією плазми, увагу привертають зміни у її хімічному складі та поява специфічної структури, що підтверджено спектральними та фізико-хімічними методами (Martínez-Huitle, Brillas, 2008). Тому така вода набуває особливих властивостей, не потребуючи спеціальних умов для її зберігання (Pivovarov et al., 2015).

Використання борошна різної якості в поєднанні зі застосуванням для замішування тіста плазмохімічно активованих водних розчинів суттєво відображається на перебігу технологічного процесу виробництва хліба та характеристиках готових виробів. У наукових роботах показано, що використання розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, при виготовленні пшеничного тіста інтенсифікує газоутворення, покращує реологічні властивості напівфабрикату, сприяє прискоренню протікання біохімічних, мікробіологічних та колоїдних процесів (Верголяс, Гончарук, 2016; Масленников и др., 2013; Malik, 2010). Узагальнені фізико-хімічні показники якості отриманого хліба та характеристика його зовнішнього вигляду відображено в табл. 3.4 та на рис. 3.1. Аналіз отриманих даних підтверджує, що для виготовлення хліба із борошна зі зниженими хлібопекарськими якостями в результаті використання плазмохімічно активованих водних розчинів спостерігається збільшення питомого об'єму хліба на 6–8 %, зростає формостійкість подових виробів в середньому на 20–35 %, поліпшується структура м'якушки і збільшується пористість до 5 % порівняно зі зразком, виготовленим на основі магістральної питної води без

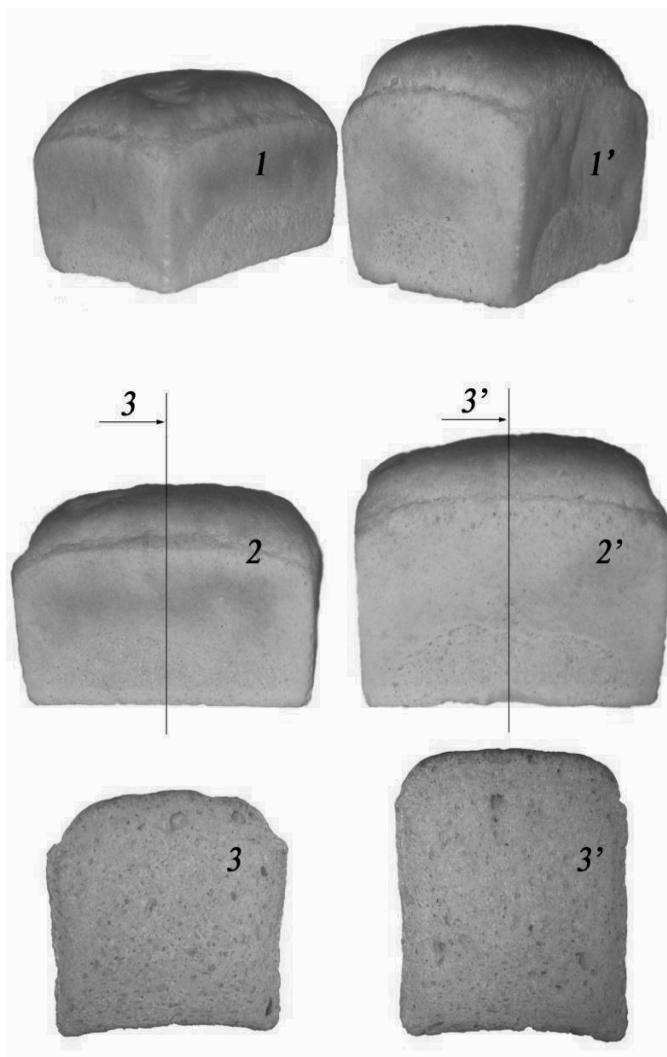


Рис. 3.1. Хліб формовий із пшеничного борошна другого сорту на основі магістральної води (1–3) та плазмохімічно активованих водних розчинів (1'–3')

додаткової обробки. У випадку використання для виробництва хліба пшеничного борошна низького сорту з підвищеним умістом периферійних частин зернівки застосування плазмохімічно активованих водних розчинів сприяє підвищенню питомого об'єму виробів на 20–23 % та формостійкості виробів на 5–10 %, покращенню пористості хліба на 4–6 %.

Фізико-хімічні показники якості дослідних зразків хліба знаходяться на рівні аналогічних значень контрольного варіанта. Однак у випадку використання борошна низького сорту вологість хліба на основі плазмохімічно активованих водних розчинів є зниженою на 0,5 %, що є передумовою для зростання продуктив-

ності виробництва за рахунок збільшення фактичного виходу хліба в середньому на 1,5 %. В обох випадках за характеристиками хліб, виготовлений з використанням плазмохімічно активованих водних розчинів, не відрізняється від виробу на магістральній воді без додаткової обробки. Важливим є те, що під час випікання хліба відбувається розкладання пероксидних сполук з вивільненням активного кисню, тому готові вироби не мають штучно привнесених хімічних речовин, є безпечними для споживання.

Хлібопекарській продукції властива втрата її якісних характеристик під час зберігання. Через деякий час після випікання та охолодження хліба відбува-

ється зниження еластичності і пружності м'якушки, її водопоглинальної здатності, зростання крихкості та підвищення жорсткості пористої структури хліба. Одночасно хліб втрачає характерний смак і аромат. Такі процеси обумовлені всиханням хліба – переміщенням вологи, а також перетвореннями, які зазнають високомолекулярні полімери хліба в період зберігання (табл. 3.5). Встановлено, що під час зберігання хліба відбувається поступова втрата вологи його м'якушкою. Для дослідного і контрольного зразків різниця значень вологості є мало помітною і знаходиться в межах похибки, однак підкреслимо, що спостерігається тенденція до менш інтенсивного зниження показника для хліба на основі плазмохімічно активованих водних розчинів.

Таблиця 3.4. Характеристики якості хліба із пшеничного борошна

Показники	Хліб з борошна,			
	виробленого зі зерна, пошкодженого клопом-черепашкою		другого сорту з високим умістом периферійних частинок	
	1 (контроль)	2	3 (контроль)	4
Питомий об'єм хліба, см <sup>3</sup> /г	3,86	4,17	3,42	4,24
Формостійкість, Н:Д подового хліба	0,29	0,43	0,27	0,26
Вологість хліба, %	40,7	40,7	44,0	43,5
Кислотність м'якушки, град	1,5	1,5	2,2	2,1
Пористість, %	82	86	75	80

Відомо, що для кінцевого споживача одним з найбільш виразних характеристик свіжості хліба є підвищення крихкості м'якушки. Аналіз отриманих даних демонструє суттєві відмінності за цим показником для дослідного і контрольного зразків. Після 24 год зберігання виробу на основі плазмохімічно активованих водних розчинів його крихкість є нижчою в середньому на 2 % порівняно з контролем. Зауважимо, що при подальшому зберіганні хліба даний показник залишається зниженим для дослідних зразків, а наприкінці дослідження різниця зростає вдвічі і сягає 4 %. Для свіжого хліба характерна висока гідрофільність м'якушки, але внаслідок старіння біополімерів цей показник поступово знижується, що свідчить про підвищення ступеня черствіння хліба.

Таблиця 3.5. Вплив плазмохімічно активованих водних розчинів на ступінь зберігання хлібом свіжості

Тривалість зберігання, год	Показник свіжості хліба					
	вологість, %		крихкість мякушки, %		кількість вологи, яку поглинає мякушка, % на сухі речовини	
	контроль	дослідний зразок	контроль	дослідний зразок	контроль	дослідний зразок
24	42,3	42,5	5	3	233	245
48	41,8	42,1	6	4	207	218
72	41,7	42,0	10	6	194	210

За результатами досліджень встановлено, що використання розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, сповільнює втрату м'якушкою гідрофільних властивостей. На всіх етапах визначення якості виробів цей показник для дослідних зразків є підвищеним на 11–14 % у порівняно з контрольними. За результатами проведених досліджень постає необхідність виявлення причин зміни споживчих характеристик хлібопекарської продукції під впливом плазмохімічно активованих водних розчинів шляхом визначення ступеня асоціації води з біополімерами виробу та встановлення мікроструктурних особливостей хліба на їх основі.

Вода в харчових продуктах відіграє важливу роль, оскільки обумовлює консистенцію і структуру продукту, а її взаємодія з присутніми компонентами визначає їх стійкість під час зберігання. Тому серед факторів, що впливають на збереження виробами свіжості, окрему увагу приділяють вмісту вологи та характеру її поведінки в готовому продукті (Huang et al., 2008; Півоваров та ін., 2012; Pelletier et al., 2013). Волога, яка міститься в хлібобулочних виробках, має різний ступінь асоціації зі складовими компонентами, залежно від якого поділяється на вільну та зв'язану. Зв'язана волога являє собою асоційовану воду, міцно пов'язану з білками, вуглеводами та ліпідами продукту за рахунок хімічних та фізичних зв'язків. Вільна волога включає воду, не зв'язану біополімерами та доступну для перебігу біохімічних, хімічних та мікробіологічних реакцій

(Abdulsudi et al., 2011; Миколенко та ін., 2014; Mykolenko et al., 2014). Характеристики хлібобулочних виробів суттєво залежать від співвідношення вільної та зв'язаної вологи в продукті.

Встановлено, що після 24 годин зберігання хліба на основі розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, вміст в ньому механічно зв'язаної вологи стає нижчим у середньому на 6 %, а осмотично зв'язаної, навпаки, на 2–3 % вищим порівняно з хлібом, виготовленим за традиційною технологією (табл. 3.6). Очевидно, такий ефект пов'язаний зі структурними особливостями плазмохімічно активованих водних розчинів. Оскільки дрібнокластерні частки води мають здатність міцно зв'язуватися клейковинними білками, то в хлібі зменшується кількість води, яка має підвищену молекулярну рухомість. Відзначимо, що в дослідному зразку водночас зі зменшенням частки вільної вологи збільшується вміст зв'язаної води на 3–4 % порівняно з контрольним зразком. Здатність до адсорбційного зв'язування вологи характерна для крохмалю – основного складового компонента борошна, який являє собою міцне і водночас лабільне утворення. Міцність структури крохмального зерна обумовлюється наявністю в ньому численних зв'язків, що поєднують між собою розміщені одна біля одної молекули. Крохмаль має підвищену чутливість до різноманітних зовнішніх чинників і тому легко змінює свою структуру. Відомо, що вода, яка взаємодіє з іонами та іонними групами, має найвищий ступінь зв'язку в харчових продуктах. Так, велика кількість груп –ОН в молекулі крохмалю свідчить про його податливість до утворення водневих зв'язків (Misra et al., 2011). Оскільки під дією контактної нерівноважної плазми вода змінює свою структуру, то цілком вірогідним є підвищення адсорбційної здатності крохмалю і, як наслідок, збільшення кількості міцно зв'язаної вологи в хлібобулочних виробках.

Протягом зберігання хліба вміст зв'язаної вологи в його мікропорах підвищується, як показують результати досліджень, у межах 6 – 9 % (табл. 3.7). Заповнення мікропор вільною вологою і перехід її у зв'язаний стан можливо пояснити виникненням водневих зв'язків між молекулами води і складовими компонентами хліба.

Таблиця 3.6. Параметри форм зв'язку вологи в м'якушці хліба після 24 годин зберігання

Форма зв'язку вологи	Кількість вологи, %	Температура видалення, °С	
		інтервал	пік
Вільна волога:	<u>83,6</u>	<u>20–121</u>	-
	79,6	20–116	-
механічно зв'язана	<u>47,6</u>	<u>20–101</u>	-
	40,7	20–90	-
осмотично зв'язана	<u>36,0</u>	<u>101–121</u>	<u>120</u>
	38,9	90–116	116
Зв'язана (адсорбційна) волога	<u>16,4</u>	<u>121–150</u>	-
	20,4	111–250	-

*Примітка: значення над рискою – показник для контрольного зразка, під рискою – для дослідного.*

Аналогічні явища описані в роботі (Миколенко та ін., 2014), в якій запропоновано декілька варіантів міграції вологи, наприклад, шляхом ланцюгового механізму з утворенням водневих містків, які міцно утримуються в капілярно-му просторі. Крім того, в хлібі також залишається присутньою вода з підвищеною рухливістю, яка, можливо, утримується в капілярах без утворення будь-яких водних містків. Така волога в першу чергу може бути видалена нагріванням і зафіксована методом диференціально-термічного аналізу у вигляді вільної вологи.

Таблиця 3.7. Параметри форм зв'язку вологи в м'якушці хліба після 72 годин зберігання

Форма зв'язку вологи	Кількість вологи, %	Температура видалення, °С	
		інтервал	пік
Вільна волога:	<u>75,0</u>	<u>20–110</u>	-
	72,9	20–110	-
механічно зв'язана	<u>41,7</u>	<u>20–90</u>	-
	38,3	20–90	-
осмотично зв'язана	<u>33,3</u>	<u>90–110</u>	<u>110</u>
	34,6	90–110	109
Зв'язана (адсорбційна) волога	<u>25,0</u>	<u>110–250</u>	-
	27,1	110–250	-

*Примітка: значення над рискою – показник для контрольного зразка, під рискою – для дослідного*



Результати досліджень показали зниження частки вологи, яка має найбільшу молекулярну рухомість, в м'якушці хліба після 72 год зберігання (табл. 3.7). Для хліба на основі розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, вміст механічно зв'язаної вологи на 3–4 % менший у порівнянні з хлібом, виготовленим за традиційною технологією. Щодо осмотично зв'язаної вологи, спостерігається тенденція до зниження її вмісту протягом всього терміну зберігання виробів. У роботах (Morgalev et al., 2010; Миколенко та ін., 2016) доведено, що для хліба характерною є втрата вологи денатурованою клейковиною з подальшим її поглинанням крохмалем. Відзначимо, що кількість осмотично зв'язаної вологи залишається підвищеною для виробів, виготовлених з використанням розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, порівняно з контрольними зразками на магістральній воді без додаткової обробки. Отже, застосування плазмохімічно активованих водних розчинів сприяє посиленню гідратаційних зв'язків у білковій фракції хлібної м'якушки.

Для дослідних зразків уміст адсорбційно зв'язаної вологи після 72 год зберігання хліба залишається підвищеним на 2–3 % порівняно з контрольними зразками. Очевидно, що за рахунок використання плазмохімічно активованих водних розчинів відбувається деяке затримання процесів молекулярного переміщення вологи всередині виробу. Відомо, що під час зберігання хліба, ступінь рухливості вільної вологи в ньому зростає, а зв'язаної, міцно асоційованої з біополімерами, навпаки, знижується (Noncharova, 2015). Слід вважати, що у виробу, виготовленому за традиційною технологією, за рахунок підвищеної рухливості води під час зберігання хліба відбувається перехід молекул води вздовж ланцюжків крохмальних полімерів, що сприяє утворенню додаткових зв'язків між ними та набуття м'якушкою структурної жорсткості. Для хлібопекарських виробів на основі плазмохімічно активованих водних розчинів, рухливість води стає зниженою, що сприяє подовженню терміну зберігання ними свіжості.

Споживчі характеристики хлібопекарської продукції, зокрема їх фізико-хімічні та органолептичні показники якості, безпосередньо пов'язані зі станом

складових виробів на мікроструктурному рівні. Для хліба з пшеничного борошна основними структурними компонентами є білок, крохмаль і вода, які під дією чинників різної природи підлягають складним перетворенням та змінюють свої властивості. Наявність води і дія температурного фактору викликають денатурацію гідратованої під час дозрівання тіста клейковини і часткову клейстеризацію зерен крохмалю. Волога протягом бродіння напівфабрикату по-різному поглинається біополімерами борошна і характер її перерозподілу між крохмалем та білком при зберіганні хліба має ряд особливостей. Зокрема, у разі використання плазмохімічно активованих водних розчинів замість магістральної води без додаткової обробки, кількість осмотично і адсорбційно зв'язаної біополімерами вологи, як в тісті, так і в хлібі, виготовленому з нього, зростає, а в мікроструктурі тіста спостерігається розгортання білкової матриці та набухання крохмальних зерен.

Мікрофотографії відображають структуру м'якушки хліба після 24 год зберігання, для якої характерною є присутність пор, обмежених міжпоровими стінками (рис. 3.2). Хліб, виготовлений з використанням плазмохімічно активованих водних розчинів, має більш тонкі міжпорові стінки (40–170 мкм) порівняно з виробом на основі магістральної води (50–250 мкм). Поверхню міжпорових стінок утворює маса коагульованого білка в поєднанні з клейстеризованим крохмалем. Відзначимо, що для хліба, як складної гетерогенної системи, клейстеризація крохмалю – найбільш суттєве перетворення, що відрізняє структуру тіста і виробу з нього. Відомо, що основна частина крохмальних зерен (92–94 %) у випеченому хлібі є деформованими і зруйнованими (Гончарова, Пугач, 2016).

Для хліба, виготовленого з використанням магістральної води, мікроструктура формується крохмально-білковою матрицею, в якій закріплені зерна крохмалю, що мають сплющений і складчастий характер (рис. 3.2,в). Підкреслимо, що в такій структурі присутні повітряні прошарки товщиною до 15 мкм.

При застосуванні плазмохімічно активованих водних розчинів м'якушка хліба включає деформовані, дещо витягнуті зерна крохмалю з втраченою гра-

нулярною формою, що з усіх сторін оточені масою коагульованого білка (рис. 3.2 *з*). Тому структура такого хліба є суцільною, без прошарків і чіткої межі між окремими складовими. Очевидно, що відмінності в мікроструктурі дослідного і контрольного зразків обумовлені підвищенням осмотичного набухання білків, активним адсорбційним поглинанням вологи крохмалем у випадку використання плазмохімічно активованих водних розчинів.

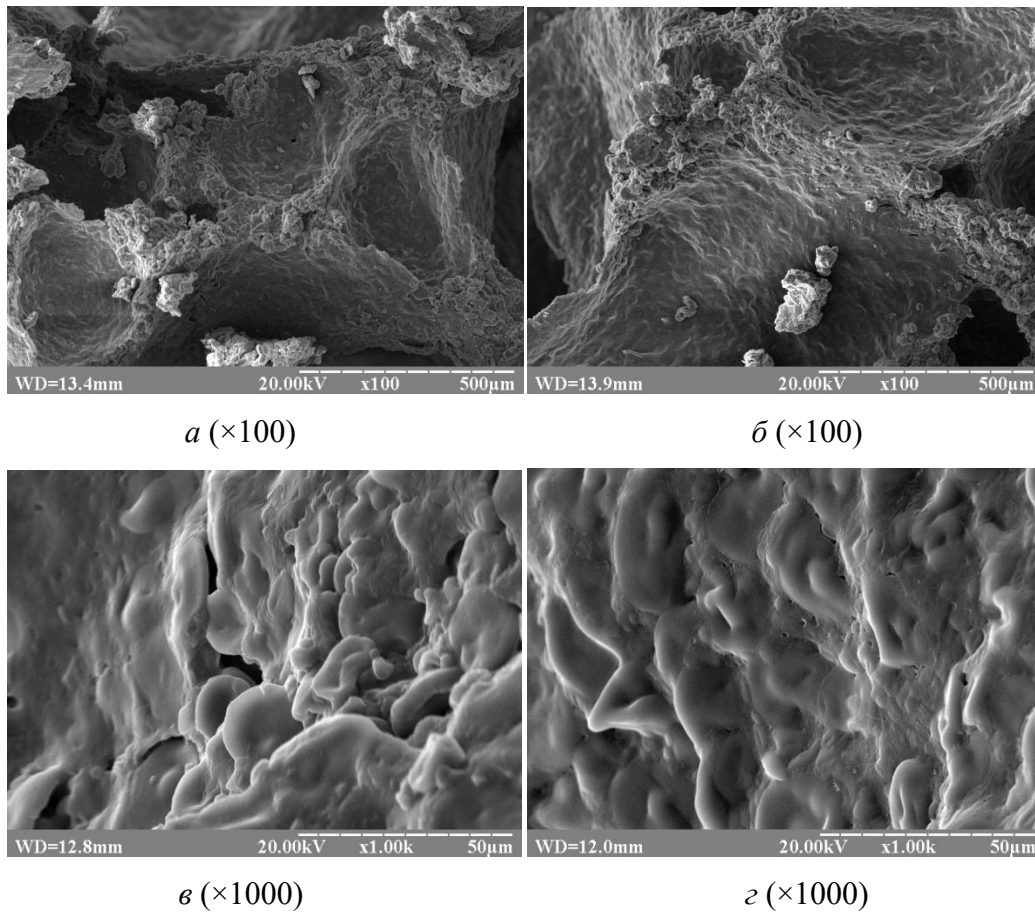


Рис. 3.2. Мікроструктура хліба на основі звичайної питної води (*а, в*) та плазмохімічно активованих водних розчинів (*б, з*) після 24 годин зберігання

За тривалого зберігання хліба відбувається зміна його органолептичних та фізико-хімічних властивостей. Зокрема, внаслідок черствіння м'якушка хліба ущільнюється, що в свою чергу залежить від її структури, вмісту білка, рівня клейстеризації крохмалю та перерозподілу вологи між компонентами. Особливості пористої структури хліба після 72 год зберігання ілюструє рис. 3.3.

У виробі на основі магістральної води без додаткової обробки присутня значна кількість повітряних прошарків, міжпорові стінки мають розпушену структуру, в якій зерна крохмалю є чітко відокремленими одне від одного (рис. 3.3,*a*). Для хліба, виготовленого з використанням плазмохімічно активованих водних розчинів, міжпорові стінки складаються з аморфної суцільної маси (рис. 3.3,*б*). Підкреслимо, що для контрольного зразка протягом його зберігання стан крохмалю і крохмалепротеїнової матриці змінюється суттєво. Відображена на рис. 3.3,*в* поверхня пор має численні вигини та бугриста за своєю структурою. Водночас матриця, сформована клейстеризованим крохмалем і білком, стає більш компактною порівняно з аналогічним за рецептурою свіжим хлібом. У результаті її згортання в структурі м'якушки присутні розриви значної довжини (понад 50 мкм). Очевидно, що такі утворення і викликають підвищення крихкості виробів та погіршення їх реологічних характеристик. На відміну від контрольного зразка, у хлібі на основі плазмохімічно активованих водних розчинів поверхня пор залишається цілісною і не містить повітряних прошарків (рис. 3.3,*г*). Для клейковинної матриці, в яку щільно упаковані зерна крохмалю, спостерігається незначне послаблення її структури, що, очевидно, пов'язано зі зниженням долі осмотично зв'язаної вологи в системі.

Таким чином, мікроструктура хліба для дослідного і контрольного зразків після 72 год зберігання відрізняється за станом крохмальних зерен. При використанні магістральної питної води вони мають більш високий рівень складчастості, що вказує на поглиблення процесів ретроградації крохмалю, тоді як застосування водних розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, сприяє збереженню форми таких включень аналогічно їх стану в свіжому хлібі.

Споживчі якості хлібобулочних виробів у період зберігання обумовлюються не лише процесами черствіння. Найчастіше кінцевий термін споживання продуктів пов'язаний з їх мікробіологічним псуванням. Нині найбільш поширеною формою мікробіологічного ушкодження хліба є його пліснявіння, збудниками якого можуть виступати десятки видів мікроскопічних грибів. Найбільш часто на поверхні виробів зустрічаються представники родів *Mucor*, *As-*

*pergillus*, *Penicillium* і *Rhizopus* (Коротков, 2007). Деякі з цих мікроорганізмів здатні продукувати афлотоксини В1, В2, А, охратоксин А, цитринин, патулін, пеніцилову кислоту та інші речовини, які викликають харчові отруєння і тяжкі захворювання людини (Vainshelboim et al., 2005; Пат. UA Україна 111577 ..., 2016).

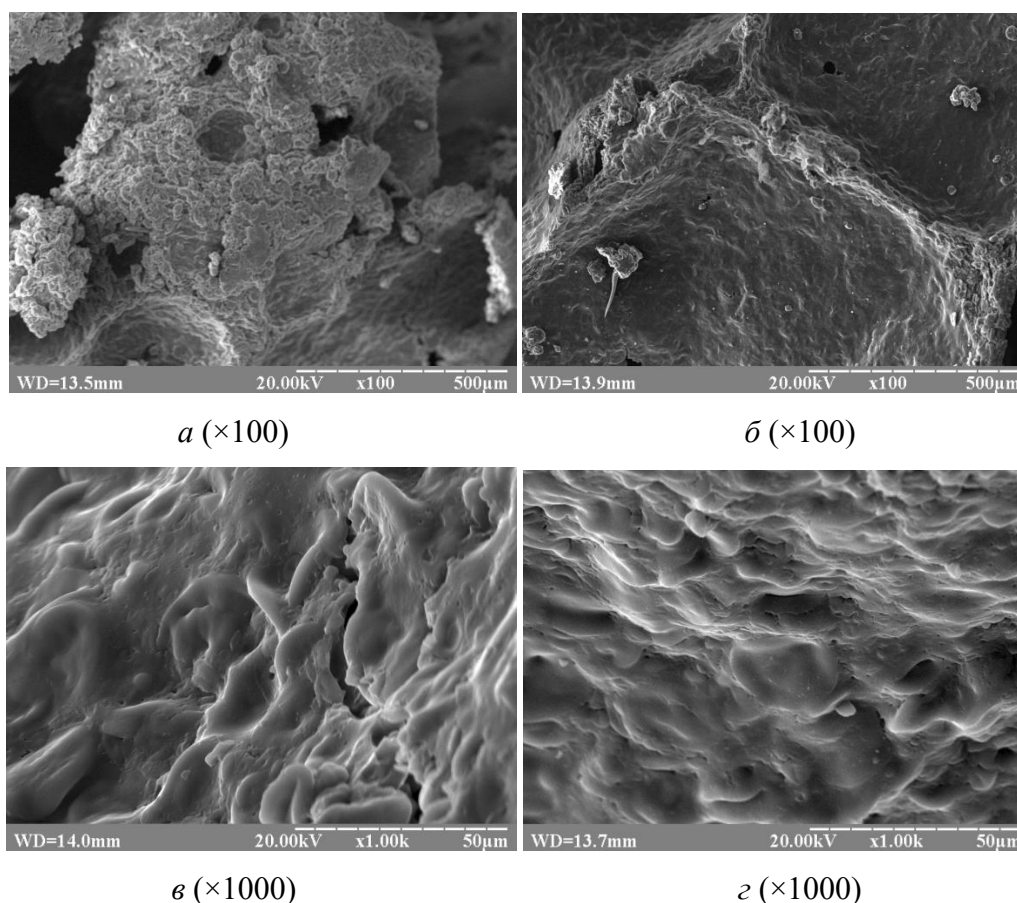


Рис. 3.3. Мікроструктура хліба на основі звичайної питної води (а, в) та плазмо-хімічно активованих водних розчинів (б, г) після 72 год зберігання

Для пліснявих грибів сприятливим для розвитку є широкий діапазон температур від 5 до 50 °С, однак інтенсивність їх розмноження максимальна при 25–35 °С. Підвищена відносна вологість середовища під час зберігання хліба також позитивно впливає на їх життєдіяльність. Вважається, що спори плісеневих грибів під час випікання хлібобулочних виробів гинуть, а зараження продукції відбувається мікроорганізмами, що містяться в оточуючому середовищі,

під час підсумкових технологічних етапів виробництва хліба – його охолодження та пакування (Методика визначення гострості ..., 1997). Однак в інших роботах наведено дані щодо тісного взаємозв'язку мікробіологічної стійкості хліба та ступеня зараженості борошна мікроорганізмами (Shields, 2001; Коротков, Яковлева, 2014).

Серед асортименту хлібобулочних виробів хліб має найбільший вміст вологи, хоча, в його складі за рецептурою відсутні речовини, наприклад, моносахариди, здатні знижувати відносну рівноважну вологість продукту та стримувати розвиток мікроскопічних грибів. Тому задля забезпечення мікробіологічної стійкості хліба ефективним є застосування таких консервантів, як пропіонова, оцтова кислоти, їх солі та інші речовини штучного походження. Найчастіше внесення таких компонентів не лише пригнічує життєдіяльність корисної мікрофлори тіста, уповільнюючи процеси його дозрівання та збільшуючи тривалість загального виробничого циклу, а і може негативно відобразитися на здоров'ї людини при споживанні виробів з їх використанням.

Плазмохімічно активовані водні розчини містять у своєму складі пероксидні і надперекисні сполуки, які за рахунок дрібнокластерної структури води здатні глибоко проникати не лише в складові компоненти хлібобулочних виробів, а і крізь мембрани мікробіологічних клітин. Пригнічення життєдіяльності хвороботворних мікроорганізмів під впливом розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, було підтверджено низкою досліджень (табл. 3.8). Отримані результати підтверджують, що в разі використання магістральної води без додаткової обробки видимий міцелій на поверхні хліба з'являється на 3 доби раніше порівняно з виробами, виготовленими на основі плазмохімічно активованих водних розчинів. Очевидно, що пригнічення життєдіяльності плісневих мікроорганізмів під час використання розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, з одного боку, пов'язане з їх здатністю чинити антисептичний вплив на мікрофлору складових компонентів продукту. З іншого боку, внаслідок дрібнокластерної структури таких розчинів, виготовлених на їх основі хліб містить більше зв'язаної вологи порівняно з контролем. Відомо, що

рівень рухливості води визначає її здатність брати участь у фізико-хімічних процесах та сприяти розвитку мікроорганізмів. За наявності високого осмотичного тиску в продуктах розвиток мікроорганізмів блокується в результаті зневоднення їх клітин. Тобто у випадку переходу молекул води у зв'язаний стан відбувається затримання процесу пліснявіння хлібобулочних виробів.

Таблиця 3.8. Стійкість хлібобулочних виробів до пліснявіння

Тривалість зберігання, діб	Оцінка мікробіологічного ушкодження плісневими грибами хліба, виготовленого з використанням	
	магістральної води без додаткової обробки	плазмохімічно активованих розчинів
1–5	-	-
6	+	-
7	+	-
8	+	-
9	+	+

Поряд з пліснявінням найбільш поширеним видом мікробіологічного псування хлібопекарської продукції із пшеничного борошна є картопляна хвороба хліба, яка є наслідком життєдіяльності спороутворюючих бактерій *Bacillus subtilis*. Уражений такими мікроорганізмами продукт може спричинити харчові отруєння людини. Борошно завжди містить деяку кількість таких бактерій та їх спор, тому з основною сировиною вони потрапляють в готові вироби. Останнім часом спостерігається зниження мікробіологічної чистоти борошна, що пов'язано порушенням агротехнічних заходів при вирощуванні зерна, недостатнім рівнем очищення зерна перед помелом, зокрема, фактичною відсутністю в підготовчому відділенні борошномельних заводів операції вологого очищення його поверхні. Зниженню мікробіологічної стійкості хліба до картопляної хвороби сприяє також те, що переважна кількість виробів на сьогодні постачається на ринок упакованими в полімерні матеріали.

Для запобігання розвитку *Bacillus subtilis* в хлібопекарській продукції використовують ряд технологічних заходів, серед яких найбільш популярними є застосування підкислюючих напівфабрикатів (закваски, рідкі дріжджі) та хар-

чових добавок хімічного та мікробіологічного походження (пропіонова, оцтова, молочна кислоти та їх солі; селектин, нізин, гідрохлорид лізину та ін.). Однак використання додаткових компонентів підвищує собівартість продукту та може негативно впливати на споживчі якості готових виробів внаслідок підвищення їх кислотності.

Результати експериментальних досліджень впливу плазмохімічно активованих водних розчинів на розвиток картопляної хвороби відображено в табл. 3.9. Аналіз отриманих даних підтверджує, що застосування плазмохімічно активованих водних розчинів пригнічує життєдіяльність споруутворюючих бактерій, стримує розвиток картопляної хвороби хліба на 50 % порівняно з використанням магістральної води без додаткової обробки.

Таблиця 3.9. Вплив плазмохімічно активованих водних розчинів на розвиток картопляної хвороби хліба

Тривалість зберігання, година	Ступінь розвитку картопляної хвороби хліба, виготовленого з використанням			
	магістральної води без додаткової обробки		плазмохімічно активованих розчинів	
	оцінка, бал	наявні ознаки	оцінка, бал	наявні ознаки
24	0	ознаки відсутні	0	ознаки відсутні
36	0	ознаки відсутні	0	ознаки відсутні
39	5	поява незначного запаху	0	ознаки відсутні
44	20	слабкий запах, липка м'якушка	5	поява незначного запаху
48	30	різкий запах, липка м'якушка	5	незначний запах

Відзначити, що такий ефект не обумовлений зміною кислотності продукту, як у випадку застосування традиційних методів запобігання розвитку *Bacillus subtilis*, а викликаний антисептичним впливом водних розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, на негативну мікрофлору борошна під час



тістovedення в результаті наявності стійкого пероксиду водню та дрібнокластерної структури плазмохімічно активованих водних розчинів.

Таким чином, застосування для виготовлення хліба плазмохімічно активованих водних розчинів замість магістральної питної води без додаткової обробки за умови використання пшеничного борошна зі зниженими хлібопекарськими властивостями без внесення додаткових поліпшувачів штучного походження дозволяє покращити характеристики якості продукції: питомий об'єм хліба зростає на 6–23 %, формостійкість – на 20–35 %, поліпшується пористість на 4–6 % порівняно з хлібом, виготовленим за традиційною технологією. При цьому органолептичні властивості хліба на основі плазмохімічно активованих водних розчинів залишаються на високому рівні.

Експериментально підтверджено, що використання розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, запобігає черствінню хлібопекарських виробів: під час зберігання сповільнюється процес втрати вологи м'якушкою хліба, знижується крихкість виробів на 2–4 % та підвищуються гідрофільні властивості м'якушки на 11–14 % ніж у контролі.

Термогравіметричним методом встановлено, що хліб на основі розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, має підвищений вміст зв'язаної вологи: залежно від тривалості зберігання кількість в ньому вологи, поглинутої білками, зростає на 1–3 %, а частка адсорбційної вологи збільшується на 2–6 % порівняно з виробом, виготовленим з використанням магістральної води без додаткової обробки. Водночас кількість механічно зв'язаної вологи, яка має найбільшу молекулярну рухливість, зменшується в м'якушці хліба до 3–6 %.

Пориста структура пшеничного хліба, виготовленого з використанням плазмохімічно активованих водних розчинів, має більш тонкі міжпорові стінки (40–170 мкм) порівняно з контрольним зразком (50–250 мкм). Мікроструктура таких виробів є суцільною, без прошарків та чіткої межі між складовими. На відміну від контрольного зразка на основі магістральної води, через 72 год збе-

рігання мікроструктурні характеристики виробів майже не змінюються порівняно з початковими етапами зберігання хліба.

Мікробіологічне псування пшеничного хліба в разі використання плазмохімічно активованих водних розчинів затримується внаслідок пригнічення життєдіяльності плісневих мікроорганізмів та розвитку картопляної хвороби в 1,5 рази, що дозволяє збільшити термін споживання виробів у 1,3–1,5 рази порівняно з хлібом, виготовленим за традиційною технологією.

### **3.3. Біотестування плазмохімічно активованої води як харчової сировини**

Вода виконує важливу фізіологічну роль для живих організмів та виступає основним активатором мікробіологічних, біохімічних та фізико-хімічних процесів у технологіях виробництва харчової і кормової продукції. Регуляція властивостей води дозволяє впливати на хід технологічного процесу (Xiaolei et al., 2013) і здатна визначати активність взаємодії водного середовища з окремими молекулами, ферментами, складними біополімерними структурами, збільшувати проникність мікрокапілярів та забезпечувати зміни й взаємодію компонентів систем на наноструктурному рівні. Використання фізико-хімічних методів обробки води є досить перспективним, оскільки за рахунок такої попередньої підготовки води можна змінити направленість її характеристик, ураховуючи потреби виробництва (Korotkov et al., 2010; Garvey et al., 2013). Серед відомих методів обробки води комплексного спрямування увагу привертає використання контактної нерівноважної низькотемпературної плазми (Martínez-Huitle, Brillas, 2008; Murielle et al., 2010; Pivovarov et al., 2015). Оскільки вода є основною складовою живих організмів, то суттєва зміна її властивостей потребує комплексної оцінки реакції тест-об'єктів для оцінки сукупної дії плазмохімічно активованої води на системи живих організмів.

Останнім часом все більшого значення набувають методи прямої оцінки токсичності водного середовища за допомогою біоіндикаторів. Актуальність

використання біологічних об'єктів для біо- і фітотестування полягає, передусім у специфічній здатності організаційної системи таких об'єктів рефлексувати на широкий спектр чинників різної природи (Верголяс, Гончарук, 2016). Оцінка біологічної рефлексії нетрадиційних методів обробки харчової сировини, зокрема використання хімії високих енергій для регулювання характеристик води, можлива з використанням методу газорозрядної візуалізації, за допомогою якого дослідники визначали антиоксидантний статус рослин в умовах токсичної дії, оцінювали якість лікарських препаратів, біологічно активних добавок тощо (Масленников и др., 2013). У свою чергу поєднання декількох експрес-методів зробило можливим надання дослідженням комплексності та набуде науково-практичного значення, оскільки вивчення фізіологічного стану об'єкта біотестування на тлі використання різних чинників передбачає здійснення цілої ланки послідовних досліджень.

Нетрадиційні методи обробки сировини в технологіях виробництва харчової і кормової продукції набувають все більшої популярності серед населення завдяки їх можливості нівелювати негативні фактори впливу щодо формування якості кінцевого продукту протягом технологічного процесу (Malik, 2010). До того ж, переваги створення екопродуктів, які не передбачають використання штучних поліпшувачів та потенційно небезпечних для людини інгредієнтів, є очевидними з точки зору кінцевого споживача, орієнтованого на здорове харчування (Huang et al., 2008; Pelletier et al., 2013). При цьому має зберігатися параметр економічної ефективності процесу за умови забезпечення мінімального навантаження на навколишнє середовище.

Застосування контактної нерівноважної низькотемпературної плазми для обробки води і водних розчинів входить до переліку сучасних способів підготовки, які мають потенційні переваги щодо використання в різних галузях промисловості, зокрема, в агропромисловому комплексі та виробництві харчової і кормової продукції. За рахунок плазмохімічної обробки вода набуває високої проникної здатності через утворення дрібнокластерної структури та появи додаткових можливостей щодо взаємодії із структурними компонентами (Півова-

ров та ін., 2012). Залежно від потреб виробничого процесу можливим є підтримання потрібних параметрів активної кислотності середовища (Abdulsudi et al., 2011). Окремою характеристикою води, підданої дії контактної нерівноважної плазми, виступає наявність у її складі активного кисню у формі пероксидних і надперекисних сполук, забезпечуючи її антисептичні властивості. Підготовлена в такий спосіб вода, здатна пригнічувати патогенні та умовно-патогенні мікроорганізми (Миколенко та ін., 2014). Відомим є також факт позитивного впливу плазмохімічно активованої води на хлібопекарські пресовані дріжджі, які за відсутності змін морфологічних властивостей та затримки росту мікробіологічної культури показали збільшення кількості життєздатних клітин *Saccharomyces cerevisiae* за умови культивування з водою, підданою дії контактної нерівноважної плазми (Mykolenko et al., 2014).

Дослідженнями підтверджено ефективність застосування плазмохімічно активованої води в різних харчових технологіях, зокрема для виробництва хлібопекарської продукції (Misra et al., 2011; Миколенко та ін., 2016). Такий технологічний підхід робить можливим одержання якісного продукту з високими споживчими якостями та підвищеною мікробіологічною стійкістю без використання штучних поліпшувачів.

Реакція живих організмів на досліджуваний фактор впливу має змогу відображати ефективність використання компонентів харчового ланцюга з огляду на біохімічний ефект та зміни характеристик об'єктів біотестування (Morgalev et al., 2010).

Незважаючи на прикладні результати і очевидну доцільність використання плазмохімічно активованої води для виробництва продукції харчового і кормового профілю, наразі є фактично відсутніми експериментальні дослідження, що розкривають вплив такої води на біологічні об'єкти з огляду на можливість появи близьких і віддалених наслідків щодо дії на їх біологічні функції.

Визначення токсичності досліджуваної проби засноване на здатності тест-об'єктів реагувати на присутність у водному середовищі речовин, які можуть негативно позначатися на їх життєдіяльності. В Україні сьогодні відбува-

ється гармонізація біотехнологічних методів, національного законодавства та стандартів зі сучасними міжнародними вимогами. Акцент має той чинник, що здійснення контролю за виробництвом продукції має відбуватися протягом усього харчового ланцюга (Noncharova, 2015; Гончарова, Пугач, 2016). Уже існуючі методи дещо поступаються сучасним, оскільки останні є більш інформативними, здійснюються в більш стислі строки і дозволяють на тлі отримання високої якості продукції досягти ресурсозберігаючого ефекту. В літературних наукових джерелах є інформація щодо використання таксонів *Decapoda*, *Paramecium caudatum*, де показник токсичності досліджуваного об'єкта визначається рівнем зміни певних параметрів функціональної системи життєдіяльності організмів за допомогою біофізичних, фізіологічних, мікроскопічних методів або шляхом візуалізації (Коротков, 2007; Korotkov et al., 2010). У деяких роботах газорозрядна візуалізація (ГРВ) демонструє можливості отримання вірогідних результатів тестування об'єктів різної природи в експрес-режимі (Коротков, 2007; Vainshelboim et al., 2005). При цьому поширення набуває визначення біопотенціалу об'єкта під час діагностики фізіологічного статусу організму людини, при дослідженні ГРВ-грам різної структури води (Vainshelboim et al., 2005). У міжнародній практиці агропромислового комплексу така практика є мало застосовуваною і фактично відсутньою у вітчизняному секторі. Наприклад, є відносно невеликий досвід використання методу інтерпретації ГРВ-грамм при визначенні біопотенціалу продукції у тваринництві (Пат. UA Україна 111577 ..., 2016).

У доступній літературі представлені результати досліджень, що свідчать про ефективність фітотестів при визначенні рівня екологічної безпеки впливу чинників довкілля, вивченні токсичності певної речовини (Morgalev et al., 2010). Наприклад, якість питної води формується певним чином під впливом саме таких чинників. Але в повному обсязі в літературі відсутня інформація щодо здійснення науково-практичних експериментів з використанням фітоіндикаторів для визначення токсичності води, підданої дії контактної нерівноважної плазми. Саме в цьому напрямку обрана тематика досліджень є актуальною

та набуває науково-практичної цінності в галузі сільського господарства і харчової промисловості.

Під час досліджень використовували магістральну воду без додаткової обробки і воду, піддану дії КНП, з характеристиками, що наведені в табл. 3.10.

Таблиця 3.10. Характеристики магістральної та плазмохімічно активованої води

№ зразка групи	Тривалість дії КНП на воду, хв	Концентрація пероксидних сполук, мг/л	pH води	Окисно-відновний потенціал, мВ
1-магістральна без додаткової підготовки	–	–	7,2	235
2-плазмохімічно активована магістральна вода	10	100	9,7	135
3-плазмохімічно активована магістральна вода	30	500	10,1	101

Обробку води контактною нерівноважною плазмою проводили в лабораторії плазмохімічних технологій ДВНЗ “Український державний хіміко-технологічний університет” на лабораторній установці дискретного типу з об’ємом реактора 0,1 дм<sup>3</sup> (рис. 3.4).

Для контрольних тест-груп біологічних об’єктів використовували питну воду міської магістралі м. Дніпро.

Резистентність об’єктів біотестування (структура води, температура, хімічний склад та ін.) впливає передусім на їх характер руху, швидкість, частоту розворотів, різноманітні таксиси, тобто позначається на їх поведінці в тестованому середовищі. *Paramecium caudatum* широко використовується для оцінки хронічної токсичності медичних препаратів та харчових добавок (Верголяс, Гончарук, 2016). В усіх досліджуваних групах ступінь виживання інфузорій становила 87,0–89,5 % - рис. 3.5.

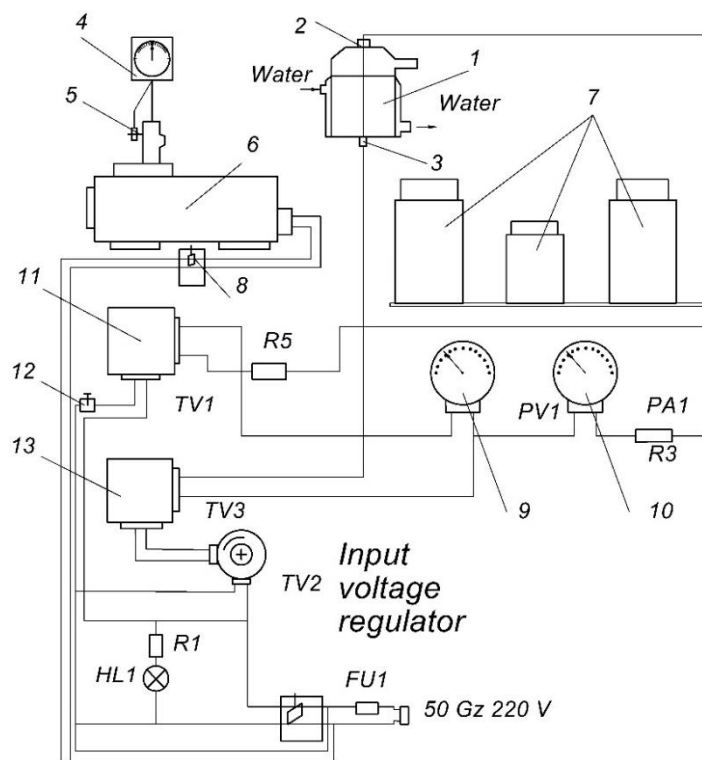


Рис. 3.4. Схема установки для плазмохімічної обробки води:

1 – реактор; 2, 3 – електроди; 4 – вакуумметр; 5 – кран; 6 – насос; 7 – фільтруючі елементи; 8 – вимикач; 9 – вольтметр; 10 – амперметр; 11 – трансформатор підпалу; 12 – вимикач; 13 – трансформатор напруги

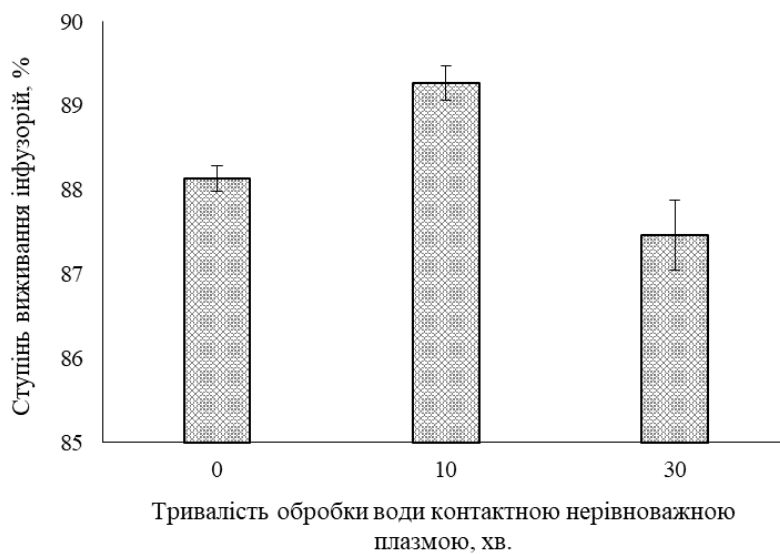


Рис. 3.5. Вивчення показника токсичності *Paramecium caudatum*

При цьому в дослідній групі 1, де одноклітинні організми культивувалися в середовищі води, піддані дії контактної нерівноважної плазми протягом 10 хв, тестована речовина відповідала класу «нетоксична». Аналогічно для дослідної групи організмів, що виступали тест-об'єктами для плазмохімічно активованої води з концентрацією пероксидних сполук 500 мг/л, цей показник був дещо нижчим, але також відносився до класу «нетоксичний».

*Artemia salina* є високочутливим гідробіонтом, яка застосовується в аквакультурі як природний корм для риб. Такі організми особливо чутливі до змін водного середовища під час вилуплення науплій. Параметри гідрохімічного режиму корегують їх вилуплення та життєву активність. Культивування науплій артемій у середовищі плазмохімічно активованої води свідчило про зміну показника їх вилуплення, рівня здатності зберігати життєву активність, рухливість в перші дні життя після вилуплення. Зокрема, значно вищий рівень вилуплення спостерігався при культивуванні *Artemia salina* у воді, попередньо підданій дії контактної нерівноважної плазми (рис. 3.6). У випадку використання плазмохімічно активованої води з концентрацією пероксидних сполук у кількості 500 мг/л кількість життєздатних організмів зростала на 60–70 % порівняно з використанням магістральної води без попередньої обробки.

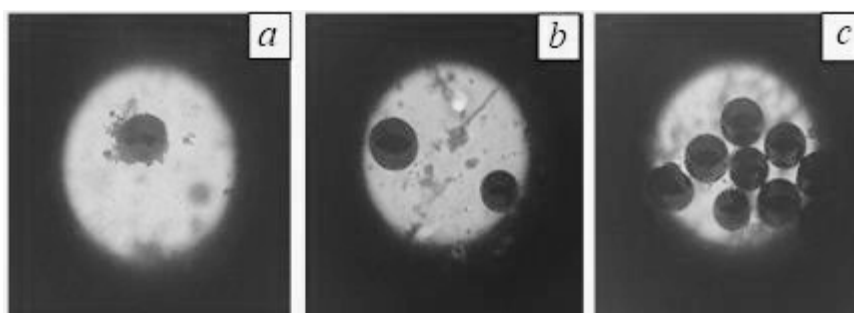


Рис. 3.6. Функціональний статус науплій *Artemia salina*, культивованої у воді, підданій дії контактної нерівноважної плазми протягом, хв:

*a* – 0, *b* – 10, *c* – 30.

Фітопланктон *Riccia fluitans* і *Lémna minor* L. є безпосередніми складовими екосистеми. Оскільки природним середовищем існування фітопланктону є



вода, то надзвичайно важливу роль відіграє і гідрохімічний стан. При культивуванні ряски малої та річчії у середовищі плазмохімічно активованої води встановлені відмінності в тенденціях розвитку фітопланктону залежно від тривалості обробки води. Результати виміру біометричних показників культури ряски малої показали, що довжина корінців ( $L_{max}$ ) в контрольній групі була найменшою порівняно зі згаданим показником у дослідних групах. Результати впливу на ряску плазмохімічно активованої води, обробленої протягом 30 хв (дослідна група 2), відрізнялися від даних контролю вірогідно, на відміну від дослідної групи 1, яка лише мала тенденцію до збільшення контрольованого показника. Інтенсивність розвитку кореневої системи тест-об'єктів зростала на 7–12 і 28–39 % порівняно з контрольною групою у випадку використання води, підданої дії плазми 10 і 30 хв, відповідно (рис. 3.7). Підкреслимо, що відмічалося зниження інтенсивності забарвлення фітопланктону в дослідних групах, а значення фітотоксичного ефекту для таких груп не перевищувало 20 %, тоді як для контролю цей показник становив 30 %.

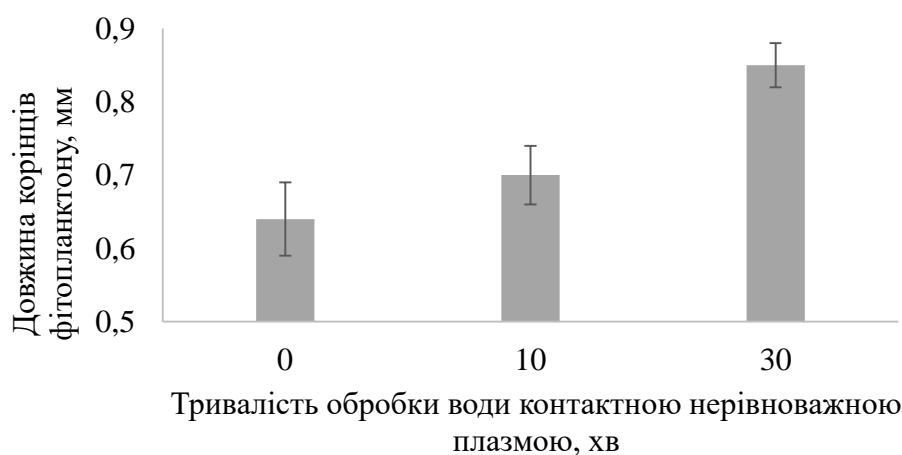


Рис. 3.7. Вплив плазмохімічно активованої води на культуру *Lemna minor* L

Короп лускатий *Cyprinus carpio* за своєю природою належить до складно організованих гідробіонтів, які мають трофічну пластичність. Ця риба живиться різними формами зоопланктону і є добре адаптованою до споживання комбікорму. Фізіологічний стан і розвиток даних гідробіонтів перебуває у прямій зале-

жності від екологічних умов вирощування, зокрема водної екосистеми. Включення до кормового раціону цьоголіток лускатого коропа артемій як живого корму та введення до його складу ряски і річчії, попередньо культивованих у плазмохімічно активованій воді, приводило до прискорення росту риб в онтогенезі та позначалося на ступені виживання гідробіонтів (рис. 3.8). Показник швидкості росту в онтогенезі дослідної групи 2 був найвищим і на 2 % перевершував значення в контрольній групі за перший тиждень досліджень, тоді як у дослідній групі 1 ця різниця становила лише 1,5 % відносно контрольної групи.

Порівнюючи масу тіла *Cyprinus carpio* наприкінці третього тижня, було виявлено, що в дослідних групах 1 і 2 особини мали вищі значення порівняно з контрольною групою на 3,5 та 6,3 %, відповідно. Для всіх досліджуваних зразків кількість екземплярів коропа, що залишалися життєздатними, знижувалася в середньому на 33 % порівняно з першим тижнем досліджень. У дослідних групах 1 і 2 риба мала на 13 та 8 % вищий показник порівняно з контролем через два і три тижні експерименту, відповідно.

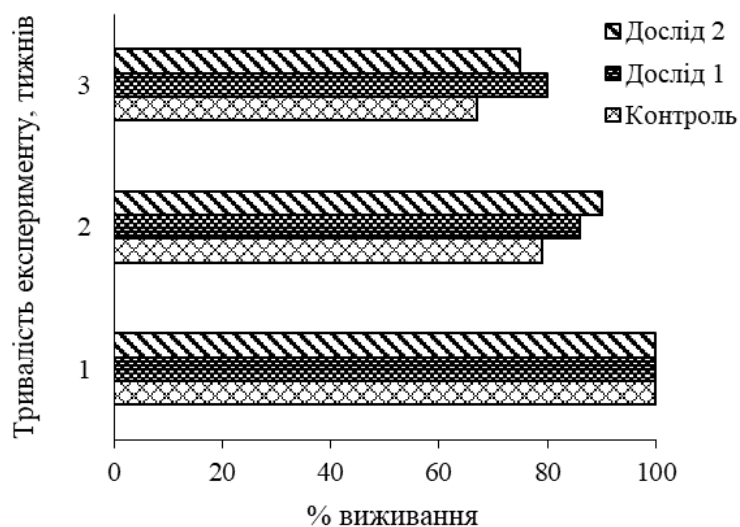


Рис. 3.8. Виживання *Cyprinus carpio* залежно від культивованого середовища і особливостей раціону,  $n = 6$

Використання газорозрядної діагностики при вивченні біопотенціалу плазмохімічно активованої води дозволило більш об'єктивно проаналізувати її характеристики. При обробці результатів враховували, що газовий розряд, що виникає під час аналізу проби, чинить вплив на стан об'єкта дослідження, викликаючи вторинні емісійні і теплові процеси (Коротков, Яковлева, 2014). Приймач випромінювання перетворює просторовий розподіл освітленості в зображення, аналіз якого приводить до формування набору параметрів. Серед чималої кількості параметрів, які були оброблені програмним забезпеченням, нами були відібрані основні за критерієм цифрового значення: ентропія і площа випромінювання у двох проекціях. Показники правої і лівої проекції контрольного і дослідного зразків показали вірогідну різницю між собою у випадку аналізу зразка води, підданого дії плазми протягом 30 хв (табл. 3.11). Різниця результатів дослідження між магістральною водою без додаткової обробки і водою, що оброблялася плазмою 10 хв, знаходилася в межах похибки вимірювань.

Таблиця 3.11. Результати визначення біопотенціалу води

Показник	Тривалість обробки води контактною нерівноважною плазмою, хв		
	0	10	30
Права проекція, ентропія	3,8±0,027	3,8±0,039	3,6±0,028
Ліва проекція, ентропія	4,0±0,066	4,1±0,086	3,3±0,036
Права проекція, площа	17123±41,1	17869±41,3	18250±35,1
Ліва проекція, площа	16164±65,1	16354±65,7	19987±54,9

Як видно з наведених у табл. 3.11 даних, плазмохімічно активована вода збільшеної до 30 хв тривалості експозиції має знижений порівняно з контрольним зразком показник ентропії.

За допомогою програмного забезпечення “GDV Capture” зафіксовано інтенсивність випромінювання на ГРВ-грамі (рис. 3.9): форма «корони світіння» та її площа після обробки води контактною нерівноважною плазмою зменшується. Вода, піддана дії контактної нерівноважної плазми, характеризувалася

вищими променями випромінювання та мала більш широкий спектр, що свідчить про підвищення її біопотенціалу порівняно з контролем.

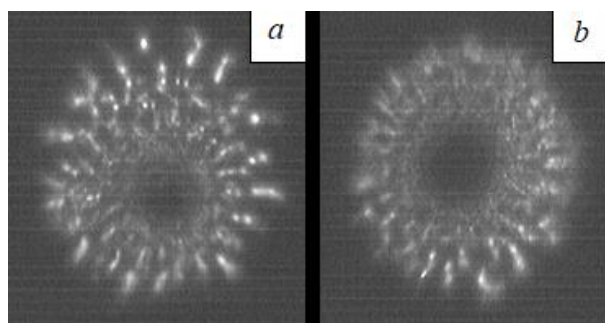


Рис. 3.9. ГРВ-грама біопотенціалу води до (а) та після обробки контактною нерівноважною плазмою (b)

Результати систематичного контролю, візуального спостереження за розвитком двох представників фітопланктону – річчії та ряски малої – показали, що така вода сприяє активації метаболічних процесів в рослинах, зміні їх пігментації. З одного боку, отримані результати надають підстави використовувати оцінку біометричних і цитологічних параметрів фітопланктону в якості індикаторів визначення зміни характеристик води під впливом чинників різної природи – фізичних, хімічних та фізико-хімічних. З іншого боку, виявлена різниця між впливом води без обробки та плазмохімічно активованої води дозволяє відмітити позитивну активуючу дію води, підданої дії контактної нерівноважної низькотемпературної плазми, на інтенсивність розвитку фітопланктону. У доступній літературі в повному обсязі відсутня інформація щодо експериментальних досліджень саме з використанням об'єкта фітотестування та такої води. Тому доцільним, враховуючи позитивні результати, буде розширити спектр досліджуваних показників та продовжити дослідження в цьому напрямі.

Біотестування зоопланктону вказує на можливість використання води, підданої дії контактної нерівноважної плазми, при інкубації науплій артемій як адаптогену та способу підвищення відсотка вилуплення науплій. Подібні експериментальні дослідження з використанням як екосистеми плазмохімічно ак-

тивованої води не проводилися. Тому даний напрям має науково-практичну актуальність, всі підстави й надалі продовжувати експериментальні дослідження. Очевидно, що підвищення рівня вилуплення науплій при культивуванні зоопланктону підкреслює промислове значення як фактор інтенсифікації виробничих процесів (Shields, 2001).

При культивуванні лускатого коропа в контрольній групі з використанням магістральної води без попередньої обробки було встановлено найнижчий відсоток виживання. Водночас загальний функціональний стан організму коропів, які знаходилися у воді, підданої дії контактної нерівноважної низькотемпературної плазми, був зафіксований як вищий, ніж у контрольній групі. В аквакультурі здійснюються дослідження щодо впливу чималої кількості чинників, розчинів, добавок на гідробіонти. Є результати науковців про позитивний вплив таких речовин різної природи; використання запропонованого методу в даній роботі при вирощуванні цьоголіток коропа не відмічено в наукових публікаціях інших авторів.

Виявлений у результаті проведених досліджень вплив плазмохімічно активованої води на життєдіяльність фіто-, зоопланктону та складноорганізованих гідробіонтів – риб – напряму пов'язаний зі зафіксованою зміною біопотенціалу води під впливом дії на неї контактної нерівноважної плазми. Об'єктами ГРВ-діагностики можуть бути біологічна рідина, рослинний або тваринний організм, біологічно активна добавка як компонент харчового продукту тощо. Дослідженнями відзначено суттєві відмінності випромінювання краплі води після фільтрації та зміни агрегатного стану з твердого на рідкий порівняно з магістральною водою (Korotkov et al., 2010). Іншими роботами встановлено, що газорозрядна візуалізація фіксувала зворотно пропорційний зв'язок між фізіологічним станом організму і показником ентропії в результаті проведеного тестування (Коротков, 2007; Коротков, Яковлева, 2014).

Результати проведених нами досліджень вказують на зміну положення одного структурного елементу (молекули води) під впливом чинників фізико-хімічної природи, яким у даному випадку виступає контактна нерівноважна ни-

знькотемпературна плазма. Слід припустити, що це відбувається за рахунок зміни орієнтації молекул, які локалізуються одна поряд з одною, що очевидно виступає додатковим підтвердженням формування дрібнокластерної структури води (Pivovarov et al., 2015). Неоднорідність поверхні і об'єму досліджуваного об'єкта, процеси емісії заряджених частинок впливає та може корегувати певні параметри електромагнітного поля, за рахунок чого змінюються характеристики струму розряду і оптичного випромінювання. Отже, ГРВ-діагностика дозволила встановити підвищення біоенергетичного потенціалу об'єкта тестування експрес-методом, що у свою чергу надає змогу обґрунтувати появу активізуючих функцій води, підданої дії контактної нерівноважної плазми, щодо біологічних об'єктів.

Запропонований комплексний підхід до дослідження та отримані позитивні результати переконують в тому, що надходження до організму гідробіонтів плазмохімічно активованої води не викликає пригнічення їх життєдіяльності, а оброблена в такий спосіб вода здатна виступати як активатор каталітичних процесів, можливо адаптогеном, імуномодулятором, гепатопротектором. Але ж для ствердження такого впливу необхідно розширити дослідження в напрямку визначення перетворень біологічних об'єктів на клітинному рівні. Очевидно, що після обробки води контактною нерівноважною плазмою така вода здатна чинити позитивний вплив на перебіг адаптаційно-компенсаторних механізмів у живих організмів, що в свою чергу позначається на показниках загального функціонального та фізіолого-біохімічного стану.

### **3.4. Висновки**

Таким чином, проведені дослідження впливу плазмохімічно активованої води на функціональний стан тест-об'єктів *Riccia fluitans*, *Létna minor L.*, *Paramecium caudatum*, *Artemia salina* і *Cyprinus carpio* доповнюють уявлення відносно безпечності використання води, підданої дії контактної нерівноважної низькотемпературної плазми, як складової харчового ланцюга.

Відсутність токсичної дії плазмохімічно активованої води на інфузорії *Paramecium caudatum* показує встановлений рівень виживання організмів на рівні 87–89,5 %. Культивування зоопланктону *Artemia salina* у водному середовищі, попередньо обробленого запропонованим способом, дозволяє підвищити кількість життєздатних організмів на 60–70 % порівняно з використанням води без попередньої обробки. Розвиток кореневої системи фітопланктону *Riccia fluitans* та *Lémna mínor L.* під впливом плазмохімічно активованої води демонстрував більшу на 7–39 % інтенсивність, яка додатково зростала зі збільшенням тривалості експозиції води, що очевидно пов'язано з наявністю активного кисню у водному середовищі. При культивуванні цьоголіток *Cyprinus carpio* у середовищі обробленої води виживання і розвиток тест-об'єктів зростали до 13 і 6 % відповідно. Методом газорозрядної діагностики виявлено, що обробка води контактною нерівноважною плазмою протягом 30 хв викликає підвищення її біопотенціалу на відміну від короткочасної експозиції води протягом 10 хв. Тобто результати біотестування поєднані із ГРВ-діагностикою вказують на відсутність токсичного впливу плазмохімічно активованої води на гідробіонти і навіть надають підстави відмітити прояви поліпшення функціональних станів таких тест-об'єктів як *Artemia salina*, *Riccia fluitans* і *Lémna mínor L.*, а у випадку *Cyprinus carpio* потребують проведення додаткових біохімічних і гістологічних досліджень. Отримані результати дослідження доводять практичну цінність поєднання комплексного підходу до біотестування інноваційних методів підготовки сировини.

#### **Розділ 4. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ТА БІОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ СОЛОДОРОЩЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ, ОБРОБЛЕНИХ КОНТАКТНОЮ НЕРІВНОВАЖНОЮ ПЛАЗМОЮ**

Активний розвиток харчової промисловості в Україні, зокрема виробництва якісного пива для внутрішнього ринку та на експорт, загострив питання розширення виготовлення солоду. Наростити виробництво високоякісного солоду можна модернізуючи діючі солодові підприємства, водночас підвищуючи їх продуктивність і ефективність. Тому напрям інтенсифікації технологій солодоращення викликає інтерес у виробників, передусім застосування активуючих агентів проростання зернових культур. За своєю природою активатори солодоращення поділяють на фізичні, хімічні, фізико-хімічні, біологічні, біохімічні, біотехнологічні та комплексні. Всі вони виконують важливе призначення – прискорюють проростання зернового матеріалу й допомагають скоротити час технологічного процесу на виготовлення солоду.

Вода є важливою складовою частиною технології солоду. Від її якості та фізико-хімічних показників залежить перебіг технологічного процесу та якість отриманого продукту. В промисловості широко використовуються і продовжують розроблятися різноманітні методи обробки води, яка застосовується в технології солодоращення. Інтенсифікації пророщування зернового матеріалу з використанням фізико-хімічних методів обробки води присвятили свої наукові праці дослідники В.Л. Касперович, Е.Б. Хілько, Г.Р. Ефімова, Е.В. Чернова, М.И. Папанова, Н.П. Щетинін, С.Е. Кочубей та інші. Однак використання води, підданої дії відомих фізико-хімічних чинників, наприклад обробці її озоном, лазерним випромінюванням, магнітним полем, ультрамікрокавітацією, електролізом, анолітом і католітом, не отримало розповсюдження через відсутність серійного обладнання і відповідної технічної документації. Більшість таких технологічних рішень до цього часу залишаються нереалізованими проектами.

Інноваційним методом підготовки води для солодового виробництва є використання електричних розрядів, серед яких окремо виділяється застосу-



вання контактної нерівноважної плазми (КНП) для обробки води та водних розчинів. Плазмохімічно оброблена вода має високу проникаючу здатність й антисептичні властивості за рахунок дрібнокластерної структури та наявності пероксидних сполук. Вода, яку піддано дії КНП, не містить у своєму складі додатково привнесених хімічних речовин, що дозволяє отримати в результаті хімічно чистий продукт (Пивоваров и др., 2006; Марченко и др., 2009; Пивоваров та ін., 2010; Пивоваров та ін., 2012).

Нині створено ряд промислово-дослідних установок для отримання плазмохімічно активованої води, проте відсутні відомості щодо впливу такої води на зернову сировину в технологічному процесі її пророщування. Тому актуальними є наукові дослідження в напрямку розробки технології виробництва солоду з використанням плазмохімічно обробленої води та визначення її впливу на процеси, що відбуваються в зерновому матеріалі під час замочування і пророщування. Використання активованої води має призвести до якісної стимуляції та подальшого корегування процесу солододорощення і отримання високоякісного й екологічно чистого зернового продукту.

Згідно зі сучасними уявленнями, вода, як згадувалося вище, після плазмової обробки, являє собою дрібнокластерну структуру, яка здатна за рахунок особливих властивостей проявляти рістстимулювальну дію, покращувати якість солоду, що викликає значний інтерес з практичної точки зору.

У першу чергу це стосується пероксиду водню та надперекисних сполук, збуджених часток та радикалів, які відіграють важливу роль в окисно-відновних процесах. Така вода після обробки плазмою може проявляти деякі раніше маловивчені властивості, пов'язані зі здатністю інгібувати життєдіяльність мікроорганізмів. Особливе місце відводиться дослідженню впливу води після її обробки КНП на технологічні параметри процесу виробництва солоду. Оброблена КНП вода викликає численні специфічні фізичні та хімічні ефекти, які можуть слугувати відправними пунктами щодо створення нових прогресивних харчових технологій. Використання води після її плазмохімічної обробки

може в багатьох випадках покращити та здешевити отримання продукції з урахуванням затрат енергії та часу на нові технологічні заходи.

Для проведення лабораторних і промислових досліджень використовували як основний об'єкт досліджень пивоварний ячмінь сорту “Скарлет”. Додатково досліджували сорти ячменю “Невада”, “Цезарь”, “Подольський” та “Гонар”. Крім ячменю, з метою порівняння, досліджували пшеницю, овес, жито, сорго, кукурудзу, соняшник, гречку, просо, сочевицю, рис, амарант, горох, квасолю. Паралельно вивчали зерно з низькою здатністю до проростання, яке зберігалось протягом 3–5 років. Основною сировиною для досліджень був обраний ячмінь сорту “Скарлет” фірми “Осева Прага” (Чехія), який має якісні пивоварні властивості; його загальна оцінка від 5,4 до 7,5 бала з 10. Зерно отримано в Інституті зернового господарства степової зони НААН України.

Уміст білка в зерні дорівнює 10,0–11,5 %, плівчастість 8–10 %, екстрактивних речовин 79–80 %. Середньостиглий, вегетаційний період становить 81–84 доби, дозріває на 3–4 дні пізніше за стандарти. Середньорослий, висота рослин 75–80 см, інколи до 93 см; на високому агрофоні може вилягати. Маса 1000 зернин висока, проте в несприятливі роки і при виляганні різко знижується. Сорт високоврожайний, на Кіровоградській держсортостанції у період з 2001 по 2010 рік середня врожайність становила 56,6 ц/га. Сорт рекомендований для вирощування в лісостеповій і поліській зонах. Характеристика якості дослідного ячмінного зерна сорту “Скарлет”: крупність – 95 %; склад дрібного зерна – 1,0 %; зернові домішки – 1,7 %; сміттєві домішки – 0,3 %; енергія проростання – 92–94%; здатність проростання – 96–98 %; білок – 10,7 %; вологість – 13,3 %.

Дослідження проводили в певній послідовності. Три ідентичні проби зернової сировини замочували у воді, обробленій КНП, з різним часом перебування, до досягнення заданої вологості зерна – 38–42 %. Обробку КНП води проводили на експериментальній плазмохімічній установці. Характеристика води: вода питна, оброблена контактною плазмою,  $C_{H_2O_2} = 600$  мг/л, рН=10,0, час активації – 30 хв (дослід № 1); вода питна, активована контактною плазмою,  $C_{H_2O_2} = 700$  мг/л, рН=9,0, час активації – 60 хв (дослід № 2); з метою порівняння отриманих ре-

зультатів як вихідного замочувального агента було використано воду питну, рН=7,6 (контрольний зразок). Температура води в усіх дослідах 17–18 °С.

Таблиця 4.1. Характеристика якості пивоварного ячменю, використаного в процесі інтенсивного пророщування

Показник	Сорт				
	Гонар	Невада	Подольський	Скарлет	Цезар
Вологість, %	3,4	4,8	3,8	3,4	3,5
Екстракт, %	76,2	77,9	75,5	76,9	77,6
Екстракт сухої речовини, %	78,9	81,8	78,2	79,6	80,4
Різниця екстракту грубого та тонкого помелу, %	1,1	1,1	1,6	1,1	1,2
Оцукрювання, хв	20,0	15,0	20,0	20,0	15,0
Кольоровість, од. ЕВС	0,3	0,2	0,24	0,26	0,3
Вміст білка, %	10,7	10,1	11,2	11,6	10,5
Розчинний білок, мг/100	601	634	645	672	692
Число Кольбаха, %	35,0	39,1	35,9	36,5	42,0
VZ 45°, %	30,8	35,8	32,8	32,8	34,2
В'язкість, mPas	1,70	1,48	1,65	1,64	1,58
Альфа-аміний азот, мг/100	99	112	106	111	115
Діастаза, WK	180	374	212	253	247
Швидкість фільтрованого конгресного суслу, хв	35	35	35	40	35
Прохід крізь сито 2,2 мм	4,6	3,1	5,2	4,0	6,5

Проростання зерна відбувалося за певної вологості. Нормальна початкова вологість ячменю не повинна перевищувати 12–14 %. Із додаванням вегетаційної вологи починається проростання. Життєві процеси в зерні стають наявними при вологості 30 %. Для швидкого та рівномірного проростання вологість доводять до 38 % (Булгаков, 1976; Півоваров та ін., 2013), того часу як для досягнення бажаного ступеня розчинення ендосперму та для накопичення ферментів необхідна вологість 44–48 %, а іноді і вище.

Для прискореного оброблення експериментальних даних, можливості прогнозування вологості зерна в подальшому і за різних значень активації водного розчину складено рівняння регресії процесу, що являє собою функцію (значення вологості) двох змінних: часу активації ( $x$ ) та тривалості контакту з

активованою водою ( $y$ ) (Казаков, Карпиленко, 2005). Апроксимуючу функцію представили у вигляді:

$$F(x,y) = 17,343 + 0,7994x + 0,0073y - 0,0624x^2 - 0,4416xy - 0,1455y^2. \quad (4.1)$$

Для всіх отриманих даних середньоквадратичне відхилення склало  $E = 0,2411$ , що свідчить про адекватність запропонованої моделі. Встановлено, що вода, оброблена контактною нерівноважною плазмою, за рахунок подрібнення кластерних структур на молекулярному рівні покращує транспорт вологи в середину зерна (рис. 4.1); поглинання такої води відбувається більш прискорено. Тривалість адсорбції вологи до нормованого рівня (44–48 %) скорочується в 1,5 раза (з 120 до 84 год), що є безумовним технологічним та економічним досягненням запропонованого способу пророщування зернового матеріалу. Вперше побудовано модель адсорбційних процесів у зерні під дією активованої води, яка включає декілька етапів (рис. 4.1).

Модель сорбційних процесів в зерні під дією плазмохімічно активованої води складається з наступних етапів: 1) прискорення дифузії води в зерно; 2) вилугування інгібіторів росту з квіткової оболонки; 3) міграція заряджених часток активованої води в середині зерна; 4) дія гідроперекисних радикалів; 5) розщеплення складових ендосперму зерна.

Як свідчать отримані дані, застосування активованої води підвищує швидкість набухання зерна (табл. 4.2). Прискорення процесу набухання відбувається за рахунок активного транспорту вологи (рис. 4.2), обумовленого підвищеною рухливістю заряджених часток в активованій воді. Найвищу швидкість набухання (0,018 г/хв) мали зразки в досліді 2, оброблені активованою водою з часом активації 60 хв.

Визначали життєздатність, енергію та здатність проростання пивоварного ячменю (табл. 4.3). Отримані результати свідчать про те, що енергія та здатність проростання, насамперед, в ячмені значно підвищується при використанні плазмохімічно активованої води.

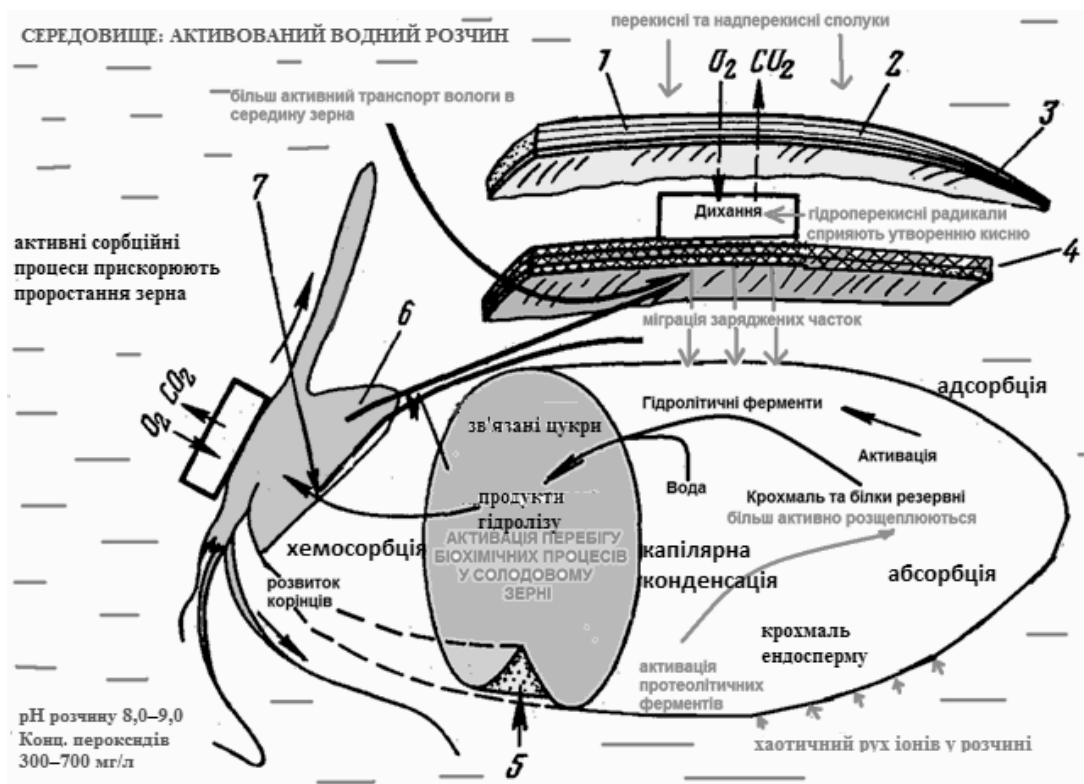


Рис. 4.1. Схема сорбційних процесів та біохімічних перетворень в різних частинах проростаючого зерна під дією плазмохімічно оброблених водних розчинів: 1 – оболонка; 2 – оболонка, що гальмує газообмін; 3 – перикарпій тіста; 4 – алейроновий шар; 5 – черевний вижолобок; 6 – щиток; 7 – вісь зарodka

Крім того, визначено динаміку до збільшення вказаних параметрів в усіх зернових культурах, які досліджувались, що свідчить про сталість позитивного впливу активованих розчинів на процес солодоращення.

Позитивний ефект спостерігається і при обробці зерна після його тривалого зберігання (3–5 років), що є корисним при використанні некондиційного зерна (з низькою здатністю проростання) та дозволяє стверджувати наявність позитивних технологічних тенденцій при переробці зерна різної якості для харчових цілей. Активне проростання зерна з тривалим періодом зберігання при використанні активованої води можна пояснити процесами, відображеними в табл.4.4 (Півоваров, Ковальова, 2012; Пат. 64761. Україна ..., 2011; Пат. 77182. Україна ..., 2013).

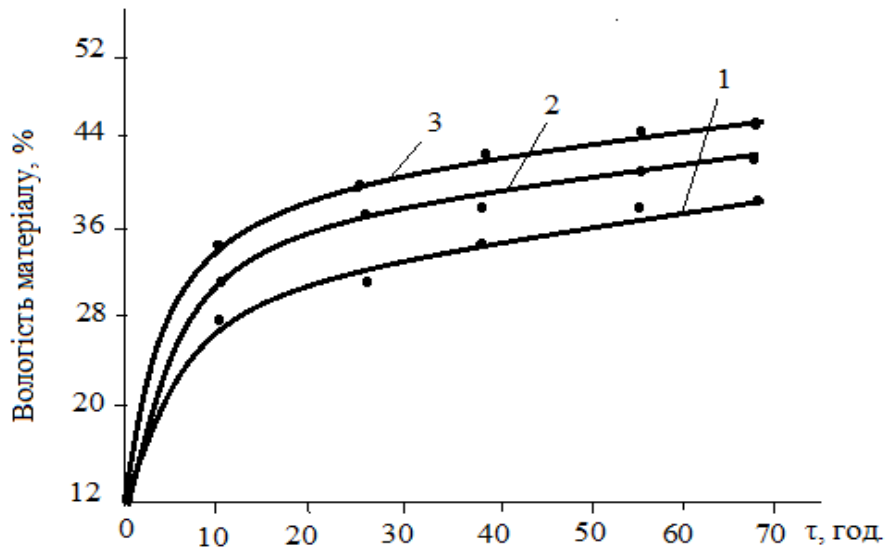


Рис. 4.2. Зміна вологості зернового матеріалу:

1 – контроль; 2 – дослід 1; 3 – дослід 2

Таблиця 4.2. Динаміка набухання ячменю при використанні плазмохімічно обробленої води

Тривалість замочування, хв	Дослідні зразки зерна, початкова маса 3 г		
	контроль	дослід 1	дослід 2
Маса матеріалу, г			
30	3,151	3,271	3,452
90	3,524	3,780	3,657
180	5,280	5,532	6,156
270	5,511	6,250	6,365
Маса вологи, поглиненої зерном, г			
30	0,151	0,271	0,457
90	0,524	0,780	0,657
180	2,280	2,532	3,156
270	2,511	3,250	3,365
Швидкість набухання, г/хв			
30	0,005	0,009	0,015
90	0,006	0,009	0,007
180	0,013	0,014	0,018
270	0,009	0,012	0,013

Таблиця 4.3. Життєздатність, енергія та здатність проростання пивоварного ячменю різних сортів при використанні води, обробленої КНП, %

Сорт	Життєздатність	Енергія проростання			Здатність проростання		
		контроль	дослід 1	дослід 2	контроль	дослід 1	дослід 2
Скарлет	98	90	92	95	93	96	98
Невада	99	89	92	94	94	97	98
Цезарь	98	90	91	94	94	96	97
Подольський	99	89	91	95	95	97	98
Гонар	97	88	90	93	92	95	96

Визначено раціональний час процесу пророщування зерна при застосуванні води, обробленої КНП. Раціональними параметрами солодощення при використанні активованої води є 4–5 діб (залежно від часу обробки води).

Таблиця 4.4. Процеси, які відбуваються в зерні за участі води, обробленої контактною нерівноважною плазмою

Назва процесу	Описання процесу	Дія активованої води
1	2	3
Прискорення дифузії води в зерно	Інтенсивність водопоглинання в перші часи замочування впливає на весь подальший процес пророщування. Насіннева оболонка напівпроникнена. Дифундувати в зерно вона дозволяє лише воді. Іони проникають крізь тріщинки насінневої оболонки всередину зерна і мають здатність впливати на зародок.	Хаотичний рух подрібнених кластерів та іонів в активованій воді дозволяє прискорити дифузію води в середину зерна за рахунок більш активного притоку заряджених часток до поверхні зерна. Цей аспект є підтвердженням того, що при застосуванні активованої води як агента замочування, завдяки її специфічному складу, відбувається більш активний транспорт вологи всередину зерна.

1	2	3
Вилуговування інгібіторів росту з квіткової оболонки	Квіткова оболонка зерна має у своєму складі інгібітори проростання, які гальмують проростання зерна в стані спокою. При замочуванні вони повинні вилуговуватися та видалятися. До того ж лужне середовище сприяє вилуговуванню з квіткової оболонки дубильних, гірких та білкових речовин. Крім того, лужний розчин сприяє миттю зерна.	Оскільки активована вода має лужну природу (перекисні та надперекисні сполуки у своєму складі), то її використання прискорює вилуговування інгібуючих рістових речовин. Перекис водню, який входить до складу активованої води, виступає в ролі окисника та як наслідок покращує очистку зерна. З іншого боку, має місце покращення проростання зерна в момент виділення кисню. Лужне середовище не створює помітного негативного впливу на подальшу якість солоду.
Міграція заряджених часток в середині зерна	Поглинання води проходить в основному через судини, які виходять на базальному кінці зерна. Після проникнення води всередину зерна починається перенос води від ендосперму до зародка.	Міграція заряджених часток у зерні викликає масовий приток до зародка від'ємно заряджених часток та відтік позитивно заряджених. Ці процеси підвищують проникненість структур зерна для води і поживних речовин.
Дія гідроперекисних радикалів	Паралельно з ростом вологості зерна підвищується активність амілаз, рибонуклеаз та фосфатаз, які потім за недостатньої кількості кисню розщеплюються.	У складі активованої води налічуються гідроперекисні радикали, які сприяють утворенню кисню, що сприяє подальшому зростанню вмісту зазначених вище ферментів та більш активному розщепленню складових ендосперму, що є причиною інтенсифікації процесу проростання зерна.
Розщеплення складових ендосперму зерна	У результаті більш активного транспорту води інтенсивніше зростає вміст води в зерні, що підвищує утворення $\alpha$ -амілаз та $\beta$ -амілаз. Ці ферменти розщеплюють крохмаль з утворенням продуктів розщеплення (глюкози, сахарози, мальтози). Підвищення утворення цих ферментів у подальшому при затиранні забезпечить необхідний ступінь оцукрювання крохмалю. Протеолітичні ферменти також більш активно накопичуються з підвищенням вологості зернового матеріалу.	Активне накопичення ферментів сприяє швидкому проростанню зерна та якісному розщепленню складових ендосперму, які в непророслому зерні перебувають у нерозчинній формі.



За рахунок замочування в плазмохімічно обробленій воді з часом активації 60 хв отримано “зелений” солод вже на 4-ту добу, оскільки проростки у 85–90% зерен розвинулися на 75% від довжини зерна. Процес проростання частково характеризується явищами, які спостерігаються візуально; до них відносять зміни зародка. Тому доцільним є візуальний контроль за зерном у перші 5–7 діб процесу пророщування, залежно від технології виготовлення солоду. Фотоспостереження ростових процесів проводили протягом 5-ти діб солодоращення (рис. 4.3).

*2 доба*



*3 доба*



*4 доба*



*5 доба*



*a)*

2 доба

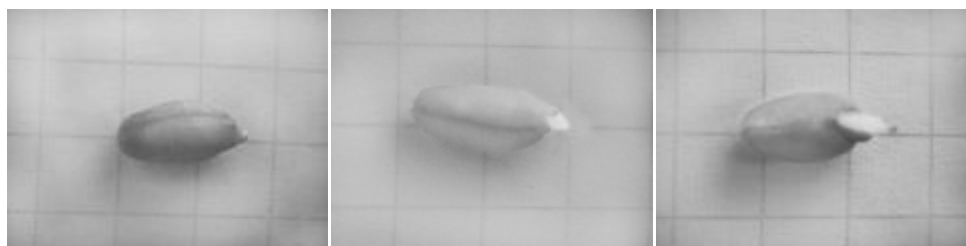


1

2

3

3 доба



1

2

3

4 доба



1

2

3

5 доба



1

2

3

б)

Рис. 4.3. Динаміка проростання зерна:

*a* – ячменю; *б* – пшениці

Позитивна динаміка спостерігалася з третьої доби. Так, зерна ячменю, оброблені активованою водою, вже мали роздвоєний корінець, що свідчить про інтенсивність пророщування. У ході досліджень встановлено антибактеріаль-

ний ефект активованої води щодо пліснявих грибів в умовах підвищеної вологості пророщеного зернового матеріалу (рис. 4.4).

Кількість пліснявих грибів у дослідних зразках, оброблених активованою водою, була  $5,3 \times 10^7$  колоній на 1 г сировини порівняно із  $9,8 \times 10^7$  колоній на 1 г сировини в контрольному зразку.

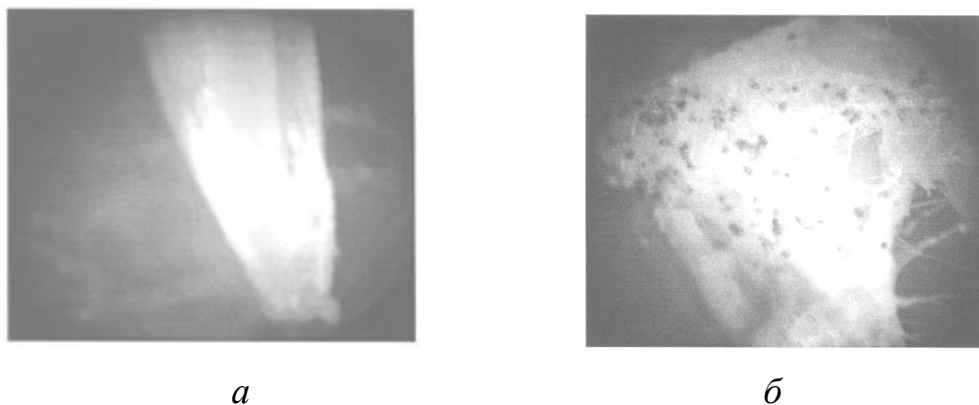


Рис. 4.4. Розвиток плісняви на зразках пророщеного зернового матеріалу: *a* – контрольний зразок; *б* – зразок, оброблений водою, отриманою під дією КНП, збільшення  $\times 56$

Доведено вищу амілолітичну активність пророщеного зерна, обробленого активованою водою, що дає можливість підтвердити робочу гіпотезу про підвищений вміст амілолітичних ферментів у дослідних зразках, а отже, і покращення якісних характеристик готового продукту (рис. 4.5).

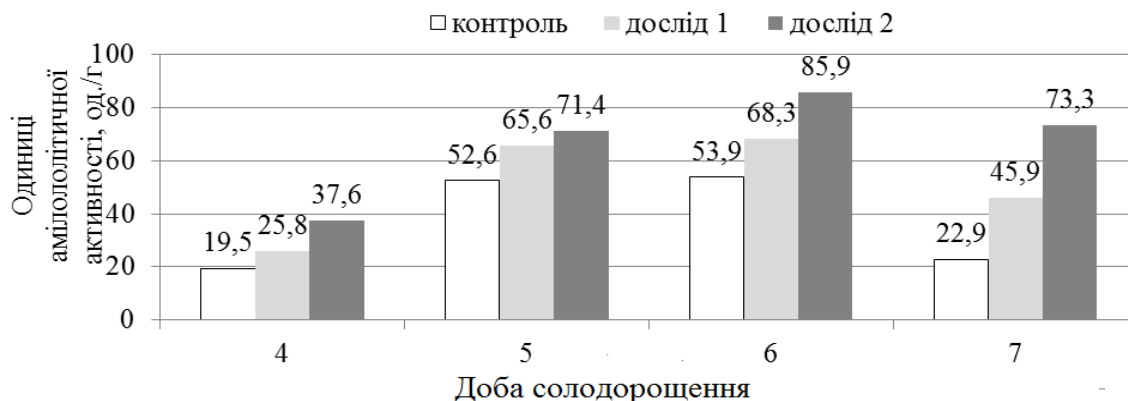


Рис. 4.5. Залежність амілолітичної активності зернового матеріалу

Уміст цукрів у солоді, який ростили із застосуванням активованої води, перевищує контроль в середньому: у ячмінному солоді – на 1,6 %; у пшеничному – на 3,9 %; у сорговому – на 3,4 %. Зміна вмісту цукрів у пивоварному ячмені при пророщуванні зерна наведена на рис. 4.6.

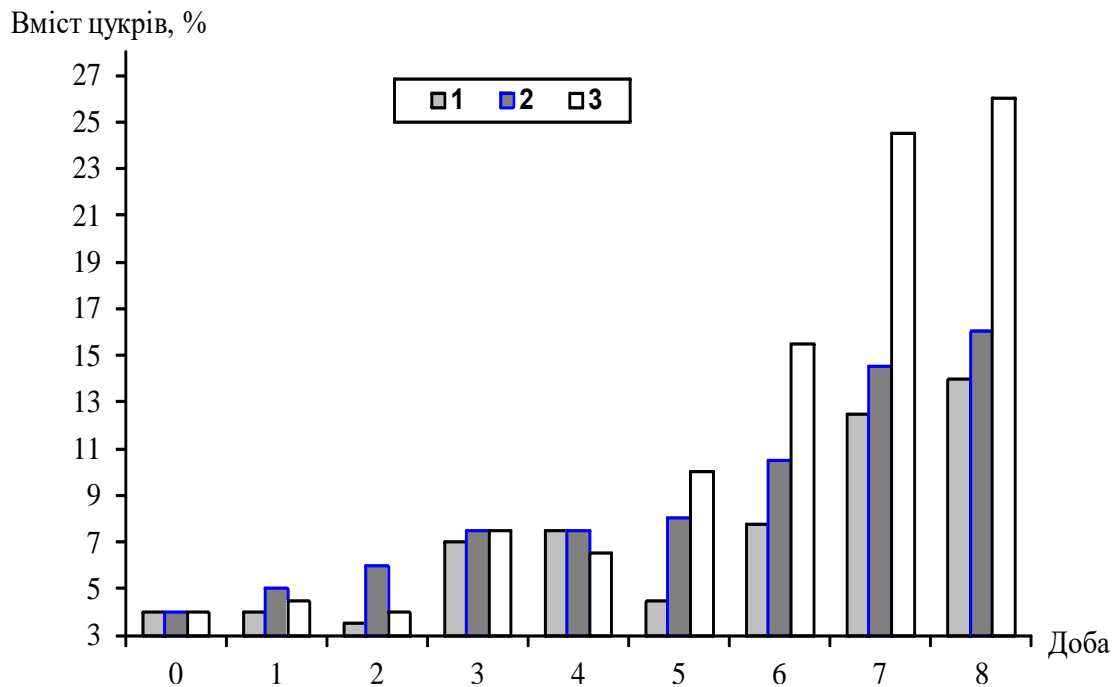


Рис. 4.6. Динаміка вмісту цукрів при пророщуванні в пивоварному ячмені: 1 – контроль; 2 – дослід 1; 3 – дослід 2.

Таким чином, було визначено, що використання активованої води є ефективним способом виробництва солоду, що супроводжується підвищенням вмісту цукрів, за рахунок збільшення амілолітичної активності в зерні. Час оцукрювання у піддослідному матеріалі скорочується на 3–5 хв; для контрольних зразків він становить 15 хв., а для зразків, що представлені в досліді 1–12 хв., 2–10 хв., при граничних показниках ДСТУ – 10–15 хв. Встановлено, що солод, пророщений з використанням активованої води, має відносно збільшення кількості борошнистих зерен на 9–11 % порівняно з кількістю скловидних та частково скловидних зерен.

Розщеплення білків при солодоращенні з подальшим затиранням відіграє важливу роль в обміні речовин дріжджів при бродінні, впливає на смак, стійкість піни та стабільність пива при зберіганні. Більша частина азотовмісних сполук зустрічається в зерні у формі високомолекулярних білкових речовин. У ході пророщування частина їх підпадає під вплив протеолітичних ферментів і гідролізується до низькомолекулярних сполук (Нарцисс, 2007). Білки, які входять до складу солоду, відрізняються як кількісним складом амінокислот, так і їх співвідношенням, що визначає їх біологічну дію на організм людини (Нарцисс, 1980). Процес розщеплення білків солодового зерна залежить від умов пророщування зернового матеріалу (Нарцисс, 2007). Ступінь розщеплення білкових речовин може змінюватися залежно від активності протеолітичних ферментів. Більшість препаратів, які застосовуються для інтенсифікації біохімічних процесів у солодовому зерні, мають складну хімічну будову та не завжди є безпечними при використанні готового продукту для харчових цілей. Практичний інтерес викликає розробка стимуляторів біохімічних перетворень, які б дозволили отримати якісний, не хімізований продукт дієтичного харчування.

Готовий солод досліджували на вміст розчинного білка за допомогою формального титрування, вміст протеолітичних ферментів – шляхом використання модифікаційного методу та вміст окремих амінокислот визначали методом іонообмінної рідинно-колончастої хроматографії (автоматичний аналізатор амінокислот Т 339). Досліди проводили з трикратною повторністю.

Доведено, що зразки, які були замочені у воді, обробленої КНП, мали більш високий вміст розчинного білка, що свідчить про наявність протеолітичних ферментів. Аналіз результатів дозволяє прогнозувати підвищення загального вмісту амінокислот. Так, чітко видно зростання протеолітичних ферментів у зразках, оброблених КНП водою, що вказує на більш активний перебіг розчинення білкових речовин. Для зернового матеріалу, пророщеного з використанням активованої води, характерним є підвищений вміст амінокислот (табл. 4.5). Аналогічним чином визначені й амінокислоти для пророщеного пшеничного солоду.

Таблиця 4.5. Вміст амінокислот в готовому ячмінному солоді, мг/г

Амінокислота	Контроль		Дослідні дані			
	кількість, мг	% по мг	кількість, мг	ефект, %	% по мг	ефект, %
Лізин	0,301	5,05	0,344	14,286	4,77	-0,28
Гістидин	0,146	2,44	0,155	6,164	2,14	-0,43
Аргінін	0,328	5,49	0,365	11,280	5,06	-0,43
ГАМК	0,106	1,77	0,128	20,755	1,77	0
Аспарагінова кислота	0,819	13,73	0,974	18,296	13,5	-0,23
Треонін	0,251	4,21	0,293	16,733	4,06	-0,15
Серин	0,319	5,34	0,386	21,003	5,35	0,01
Глутамінова кислота	0,959	16,06	1,189	23,980	16,48	0,42
Пролін	0,506	8,47	0,644	27,273	8,93	0,46
Гліцин	0,344	5,76	0,387	12,500	5,37	-0,39
Аланін	0,439	7,35	0,522	18,907	7,23	-0,12
Цистин	0,082	1,38	0,087	6,098	1,21	-0,17
Валін	0,257	4,3	0,317	23,346	4,39	0,09
Метіонін	0,102	1,71	0,131	28,431	1,82	0,11
Ізолейцин	0,16	2,68	0,208	30,000	2,89	0,21
Лейцин	0,425	7,13	0,508	19,529	7,04	-0,09
Тирозин	0,153	2,56	0,264	72,549	3,65	1,09
Фенілаанін	0,272	4,57	0,313	55,074	4,34	-0,23
Всього:	5968	100	7216	29,912	100	0

Вміст вільних амінокислот у харчових продуктах має високу біологічну і харчову цінність при застосуванні в дієтичних продуктах (покращуються обмінні процеси в організмі, підвищується імунітет та ін.) (Бажай, 2005). Слід зазначити, що вміст амінокислот виріс як по окремих амінокислотах, так і в сумарному відношенні. Дуже важливим аспектом досліджень є значне збільшення кількості незамінних амінокислот, коливання ефекту становить 14–58 % і залежить від амінокислоти.

Одним із важливих факторів, які впливають на вміст легкозасвоюваних речовин солодового зерна, є вологість зернового матеріалу.

У разі використання води, обробленої контактною нерівноважною плазмою, за рахунок подрібнення кластерних структур води на молекулярному рівні покращується транспорт вологи всередину зерна; таким чином концентрація амінокислот зростає в зразках з підвищеним умістом вологи. У цьому випадку

підтверджується закономірність: чим вище вологість зернового матеріалу, тим вище розчинність білків. Ступінь розчинення білків фіксувалася на сьому добу пророщування.

Отримані дані свідчать про підвищення ступеня розчинення білків у зразках зі зростанням вологості на 10–15 % порівняно зі зразками, які були замочені водопровідною водою, що показує ефективність використання оброблених контактною нерівноважною плазмою розчинів як біохімічних стимуляторів обмінних процесів у зерні.

Фізико-хімічні та органолептичні показники готового солоду (табл. 4.6), отриманого по удосконаленій технології з використанням води, обробленої КНП, відповідають чинному ДСТУ.

Таблиця 4.6. Фізико-хімічні показники ячмінного пивоварного солоду

Показник	Контроль	Дослід 1	Дослід 2	ДСТУ 4282:2004
Масова частка вологи, %	4,5	4,6	4,7	4,0–5,8
Масова частка екстракту в сухих речовинах, тонкий помел, % (E <sub>2</sub> )	82,0	82,3	82,5	76–80
Масова частка білкових речовин у сухих речовинах солоду, %	10,1	10,2	10,3	10,5–11,5
Різниця масових часток екстрактів, %	1,5	1,5	1,4	1,0–3,5
Колір сусла, см <sup>3</sup>	0,23	0,24	0,25	0,18–0,40
Число Кольбаха, %	41,5	42,0	42,5	39–41
Швидкість фільтрування сусла, хв	20	20	21	–

Шляхом оцінки отриманого продукту встановлено відповідність якості солоду, виготовленого по запропонованій технології зі застосуванням плазмо-хімічно обробленої води, а готовий продукт може бути застосований для подальшої переробки в пивоварному виробництві.

Температура сушіння пророщеного матеріалу є прийнятною для повної термодеструкції пероксиду водню та надперекисних сполук, які вміщено в обробленій контактною нерівноважною плазмою воді. У підсумку готовий кінцевий продукт не має у своєму складі привнесених токсичних хімічних речовин, а

характеризується як хімічно чистий та безпечний продукт для подальшої переробки та застосування в приготуванні дієтичної продукції, наприклад продуктів дитячого харчування. Зерновий матеріал з таким складом нормалізує загальний обмін речовин, виводить токсин та шлаки з організму людини (Мальцев, 1964).

Використання води, обробленої контактною нерівноважною плазмою, дозволяє отримати високоякісний дієтичний продукт, без домішок хімічних препаратів, антисептиків та гормональних стимуляторів росту за екологічно безпечною технологією, в якій не використовуються токсичні речовини. У результаті більш активного перебігу біохімічних процесів у зерні при використанні таких розчинів у пророщеному матеріалі зростає вміст легкозасвоюваних організмом людини білкових речовин. Солод має значно підвищений вміст амінокислот, що є важливим технологічним результатом при виробництві продукції з високим умістом біологічно активних компонентів.

Застосування активованих розчинів під час приготування солоду сприяє розширенню технологічних можливостей виробництва високоякісного продукту, удосконаленню якості та екологічній безпеці, значному скороченню витрат на виробництво.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що оброблена контактною нерівноважною плазмою вода має властивості, які здатні інтенсифікувати біохімічні процеси в зерні, зокрема процес розщеплення білків, та покращити при цьому якість солоду, а в перспективі забезпечити харчове виробництво хімічно чистою сировиною високої якості.

**Процеси адсорбції та десорбції плазмохімічно обробленої води зерновим матеріалом у виробництві солоду.** На сучасному етапі розвитку солодова інженерія стає технічно складною та наукоємною. Тому необхідно принципово нове розуміння організації технологічного розвитку солодового виробництва, яке гарантовано може забезпечити високу віддачу за менших витрат. В умовах загострення конкуренції, як серед українських, так і закордонних виробників солоду, на перший план висуваються проблеми підвищення якості та екологічної безпеки солодового продукту. Адже солод є важливою біологічною добав-



кою, яка широко використовується в харчовій промисловості при виробництві кукурудзяних і рисових пластівців, хлібобулочних виробів, дитячого харчування, молочного та білого шоколаду, пива, солодових екстрактів, крохмалю, спирту, квасу та ін. Пророщені зерна злаків застосовують як підсолоджуючі та смакові добавки, завдяки вмісту в пророщеному солоді мальтози, глюкози, сахарози, фруктози та амілози (Потапенко та ін., 2006).

Сучасні технології отримання солоду дають можливість переходу максимальної кількості натуральних харчових компонентів із зерна в солод. Відомо, що до складу солоду входять білки, жири, вуглеводи, ферменти, вітаміни В, В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, С, Е, РР, фолієва кислота, мінеральні речовини і великий набір мікроелементів: калій, магній, кальцій, залізо, мідь, фтор, цинк (Калунянц, 1992).

Підсумковою стадією технологічного процесу виробництва свіжопророслого солоду є сушіння, основною метою якого є зниження вмісту вологи з 40-50 до 3-6 %, тобто до рівня, який перешкоджає розвитку шкідливих мікроорганізмів. Солод у цьому випадку набуває специфічного присмаку, кольору, аромату та зберігає високу ферментативну активність. Тому сушіння солоду являє собою поєднання складних нестационарних процесів тепло- і масообміну та біохімічних перетворень, в результаті яких завершуються біохімічні процеси, що відбувалися під час пророщування зерна.

Значні витрати енергії на сушіння зерна створюють передумови для більш глибокого вивчення процесів видалення вологи з рослинної сировини. Комплексний аналіз проблеми показав, що інтенсивність процесу сушіння може підвищити, якщо відійти від класичного уявлення про дану технологію, та запровадити нові елементи, які будуть впливати на об'єкт обробки не тільки фізично, але і мати хіміко-біологічний вплив.

Свіжопророслий солод під час сушіння зазнає глибоких фізичних, фізіологічних та біохімічних змін, які залежать від швидкості зневоднення, температури сушильного агента, вмісту вологи та умов сушіння. У процесі сушіння солоду значно змінюється його хімічний склад. Спочатку відбувається прискорення гідролізу крохмалю, що призводить до збільшення кількості цукрів. За

високих температур сушіння розщеплюються білки та продукти їх гідролізу, що зменшує вміст простих вуглеводів.

Солод характеризується великою кількістю води і малим умістом сухих речовин. Основна частина води знаходиться у вільному вигляді і лише близько 5 % пов'язано з клітинними колоїдами і міцно в них утримується. Цим пояснюється легкість сушіння солоду до вологості 12-14 % і перешкоджання видалення залишкової вологи (Калунянц, 1992; Бажай, 2005).

Для потрібної проникності оболонки зерна останнім часом широко використовують стимулятори та інгібітори пророщування зерна в процесі його замочування. До таких інгібіторів належать пероксид водню, перманганат калію, хлорид марганцю, хлорне залізо, екстракти деяких рослин, цитолітичні ферменти.

Безумовно, являє інтерес використання плазмохімічно обробленої води, як зволожуючого середовища зерна, з метою отримання якісного, без будь-якого привнесення зовні хімічних сполук солоду. Доведено, що вода, сформована з кластерів, які під дією плазми подрібнюються, за рахунок чого суттєво зростає проникна здатність подрібнених кластерів в об'єм зерна та сприяє зростанню біологічної активності в процесі солодоращення. Потрібно було з'ясувати вплив плазмохімічно обробленої води на сорбційні властивості зернового матеріалу і в подальшому видалення такої ж вологи зі свіжопророслого солоду під час сушіння.

У дослідженнях було використано зерно таких культур, як жито, горох сорту "Ранній", сочевиця, гречка, кукурудза сорту "Цукрова", суміш житнього солоду, яке використовують на ТОВ "Укрсолод", м. Дніпро.

Для замочування використовували плазмохімічно оброблену магістральну воду з параметрами: вміст пероксидних сполук від 200 до 600 мг/л, *pH* від 8 до 10,5. Процес пророщування здійснювали згідно з методикою, передбаченою стандартом ДСТУ 4138-2002. Плазмову обробку води проводили зі застосуванням плазмохімічної лабораторної установки в скляному реакторі періодичної дії, об'ємом 0,08 дм<sup>3</sup>. У ході проведення досліджень було визначено також

уміст цукру в готовому солоді, досліджено адсорбційні властивості зерна та процес сушіння солоду при використанні плазмохімічно оброблених розчинів.

Окисно-відновний потенціал та рН визначали шляхом вимірювання з платиновим та хлоросрібним електродами порівняння. Вміст пероксиду водню в плазмохімічно обробленій воді розраховували за допомогою тест-систем “Merckoquant Peroxide Tests”. Значення ОВП виражали через від’ємний логарифм тиску водневих іонів у редокс-системі (rH) за формулою Нернста (Справочник химика, 1964).

$$rH = \frac{Eh+200}{30} + 2pH, \quad (4.2)$$

де,  $rH$  – від’ємний логарифм концентрації іонів водню;  $Eh$  – потенціал, який виникає в даному середовищі на платиновому електроді;  $pH$  – активна кислотність середовища; 200 – поправка на потенціал хлоросрібного електрода відносно водневого; 30 – коефіцієнт перерахунку, взятий із формули Нернста.

Солодорощення проводили зі застосуванням лабораторної солодовні, яка представляла собою набір пластикових ємкостей, на поверхні яких розміщували фільтрувальний папір, змочений плазмохімічно активованим розчином. На даній поверхні ємкостей також укладали фільтрувальний папір, попередньо змочений водою, обробленою КНП. Для порівняння в декілька аналогічних ємкостей розміщували фільтрувальний папір, змочений магістральною водою. Тривалість процесу солодорощення визначали шляхом візуального контролю за зразками, які розташовували на поверхні фільтрувального паперу, у кількості зерен, визначених відомою методикою (ГОСТ 10968-88 Зерно).

У міру досягнення відповідних показників солодорощення отриманий солод вилучали зі солодовні і піддавали сушінню в багатоярусній сушарці періодичної дії за температури від 43 до 87 °С. Під час сушіння досліджували процес видалення вологи зі свіжопророслого солоду, методом зважування зразків протягом 14 год. У висушеного солоду видаляли ростки, та передавали його на лабораторний аналіз для визначення вологості та вмісту цукру.

Вміст цукру в солоді фіксували рефрактометричним методом. Для кожного зразка було проведено по 3 виміри та виведено середньоарифметичне значення.

Також було досліджено ступінь набухання зернових культур та характер взаємодії з навколишнім середовищем за зміною кислотності. Навіски зернових культур масою 3 г по 4 зразки кожного виду зважували на аналітичних вагах. Зразки вкладали у хімічні стакани об'ємом 200 мл і заливали 100 мл плазмохімічно обробленими розчинами, час активації яких становив 5, 10, 15 хв. Для контролю використовували магістральну воду; далі визначали  $pH$  середовища набухання через 10, 20, 30, 40, 60 хв та 24 год. після початку досліду. Для контролю кислотності водних середовищ використовували прилад “ $pH$  150 М”. Паралельно вимірювали ступінь набухання зерна методом зважування замоченого зерна кожні 30, 60, 90, 120, 150 хв та 24 год. від початку досліду.

Через 24 год. після замочування розчини обережно зливали, а зерно, ретельно промокнувши фільтрувальним папером, зважували та розраховували ступінь набухання за формулою (ГОСТ 10968-88 Зерно).

$$\alpha = \frac{m - m_0}{m_0} 100 \%, \quad (4.3)$$

де  $\alpha$  – ступінь набухання зерна, %;  $m_0$  – вихідна маса наважки зерна, г;  $m$  – маса наважки зерна після набухання, г.

Житній солод пророщували за встановленою методикою при температурі 17 °С протягом 3 діб та 5 діб – для солоду із гречки, гороху, кукурудзи та сочевиці з використанням магістральної та плазмохімічно обробленої води. Термін пророщування становив у разі застосування магістральної води 4–7 діб до досягнення показників, які характеризують кінцеву якість продукту. Солод отримано при використанні плазмохімічно обробленої води з терміном плазмової активації 5, 10, 15 хв. Візуальним спостереженням та фіксацією шляхом фотографування зразків встановлено, що зерна набували кінцевих властивостей залежно від терміну плазмохімічної обробки вихідної води. З'ясовано, що найбільш

ефективно розвивалися зернові культури в разі застосування води, яку обробляли контактною нерівноважною плазмою протягом 10 та 15 хв. Зерна, паростки та корінці в період солодородження набували оптимальних розмірів за більш короткий термін (майже на 1 добу) порівняно з пророщуванням зерна, замоченого водою з магістральних мереж.

Важливою умовою процесу пророщування солоду є наявність вологи, яка, проникаючи крізь зернову оболонку, адсорбується і активує життєдіяльність зерна з появою в ньому вільної вологи. З моменту занурення зернової культури у вологе середовище утворюється різниця концентрацій води зовні та всередині зерна, внаслідок чого вода починає проникати крізь оболонку в клітини завдяки здатності гідрофільних речовин до поглинання вологи, підкорюючись законам дифузії та осмосу.

У процесі адсорбції спостерігається більш швидке поглинання вологи зерном при застосуванні активованих розчинів до 3,5 %, ніж зі звичайної магістральної води. Полов'яна оболонка зерна на початку замочування непроникна для води, оскільки вона зовні вкрита потовщеними клітинами та просоченими речовинами, які не пропускають воду. В зерно вода дифундує по тонких капілярах трахеїдах зародкової частини, яка не покрита полов'яною оболонкою. Спочатку клітини плодової та насінневої оболонок адсорбують воду, яка поступово просувається всередину зерна. На проникності оболонок ґрунтується використання стимуляторів та інгібіторів проростання зерна в процесі замочування. Таким є пероксид водню та надперекисні сполуки, які утворюються в процесі плазмохімічної активації водних розчинів. У разі обробки води нерівноважною плазмою, внаслідок фізико-хімічних перетворень у рідкому середовищі, відбувається утворення збуджених часток та радикалів, що також супроводжується структурними перетвореннями на кластерному рівні. За рахунок подрібнення кластерів під дією контактної плазми відбувається зростання проникної здатності в об'єм зерна, що сприяє біохімічним перетворенням у процесі замочування та пророщування зерна (табл. 4.7).

Таблиця 4.7. Вплив активованих водних розчинів на процес адсорбції зерна

Тривалість замочування зерна, хв	Вихідна вода			
	магістральна (контроль)	оброблена КНП, 5 хв	оброблена КНП, 10 хв	оброблена КНП, 15 хв
	Маса наважки, г			
0	3	3	3	5
30	3,28	3,36	3,36	3,36
60	3,36	3,36	3,36	3,36
90	3,42	3,46	3,44	3,44
120	3,45	3,47	3,46	3,51
150	3,53	3,49	3,52	3,55
180	3,61	3,65	3,68	3,72
1440	4,16	4,24	4,26	4,31

Даними проведених досліджень підтверджено ефективність застосування плазмохімічно оброблених розчинів у процесі замочування, при цьому целюлозно-пектинові оболонки зерна інтенсивно абсорбують вологу, завдяки якій спостерігається активне набухання колоїдних речовин. Причому, одна їх частина слугує гелями з обмеженим ступенем набухання (крохмаль, клітковина), друга частина здатна необмежено набухати (білки та високомолекулярні продукти розпаду білків) – рис.4.7.

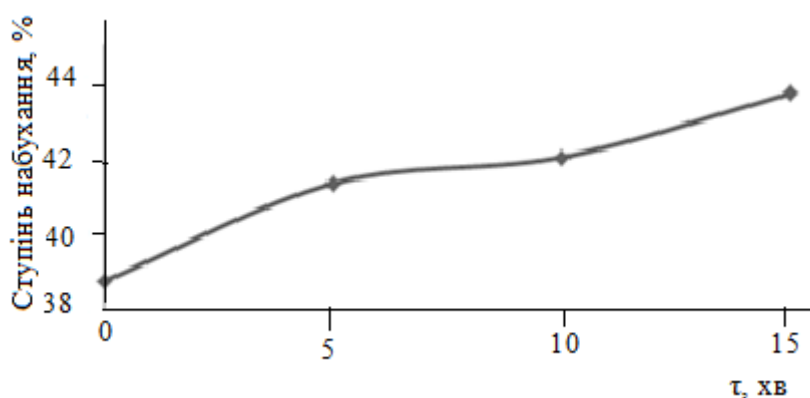


Рис. 4.7. Залежність ступеня набухання зерна від часу обробки водних розчинів КНП

Протягом першої години набухання проводили вимірювання рН середовища зерен злакових культур (табл.4.8). Кислотність середовища зменшувалася незначно за перші 10 хв та за 60 хв; зсув рН до лужної зони становив від 9,88 для гороху (час активації 15 хв) до 8,75 для гречки (час активації 10 хв).

Далі кислотність середовищ змінювалася в кислу область і через 24 год. із надходженням до водного середовища певної кількості CO<sub>2</sub> спостерігали найбільш виражену кислотність: 6,45 для жита (час обробки води КНП 15 хв) та 6,48 для кукурудзи (КНП 15 хв).

Таблиця 4.8. Дослідження впливу плазмохімічно активованих розчинів на величину рН у процесі набухання

Зернова культура	Обробка розчину КНП, хв	Тривалість набухання, хв					
		10	20	30	40	60	1440
		рН					
Жито	0	7,92	8,04	8,03	80,1	7,87	7,53
	5	8,31	8,10	8,03	7,93	7,89	7,32
	10	8,98	8,22	8,05	7,96	7,90	6,63
	15	9,42	8,84	8,71	8,40	8,12	6,45
Горох	0	7,95	8,52	8,71	8,54	8,26	6,94
	5	8,84	8,81	9,26	8,43	8,19	6,87
	10	9,19	9,16	9,26	8,86	8,30	6,78
	15	9,88	9,37	9,27	8,72	8,26	6,62
Сочевиця	0	8,05	8,13	8,13	80,3	7,56	7,07
	5	9,16	8,83	8,71	8,47	8,02	6,96
	10	9,14	8,83	8,65	8,30	7,96	6,80
	15	9,68	9,44	9,17	8,73	8,14	6,74
Гречка	0	7,93	7,96	7,75	7,63	7,85	7,04
	5	8,16	8,02	7,83	7,82	7,81	6,93
	10	5,57	8,19	8,05	7,95	8,75	6,94
	15	9,15	8,51	8,26	8,06	7,91	6,86
Кукурудза	0	8,28	8,82	7,81	8,72	7,87	7,06
	5	8,20	7,93	7,84	7,71	7,75	6,97
	10	8,54	7,76	7,65	7,53	7,55	6,94
	15	7,95	7,57	7,41	7,24	7,11	6,48

Сирий солод, як матеріал, що має високу вологість, не придатний для довгострокового зберігання, а його хімічний склад не відповідає вимогам Держа-

вного стандарту України. В сирому солоді міститься велика кількість білків, які під час розчинення у воді утворюють стійкий мутний розчин. Крім того, свіжо-пророслий солод має паростки, які можуть надавати кінцевому продукту гіркуватого присмаку. Тому сушіння є необхідним етапом виробництва солоду.

Сушіння проводили за рахунок продування через шар зеленого солоду гарячого повітря потрібної температури з помірним підвищенням (Ермолаєва, Колчева, 2000).

Як відомо, рослинна сировина має капілярно-пористу структуру. Хімічний склад представлений вуглеводами, білками, ліпідами. У невеликих кількостях містяться біологічно активні речовини, які визначають смак і біологічну цінність сировини: поліфеноли, вітаміни, органічні кислоти, мінеральні речовини. Ці компоненти найбільш схильні до несприятливих змін при підготовці продукту до сушіння, а також у процесі сушіння, що і призводить до зниження біологічної цінності готового продукту і зміни його властивостей при сушінні.

Важливо зберегти ферментні системи, які чутливі до підвищення температури. За низької вологості вони можуть витримувати і більш високу температуру, тому процес сушіння можна розділити на три фази: фізіологічну, ферментативну та хімічну. Фізіологічна фаза характеризується досягненням температури в солоді 45 °С та зниженням вологості до 30 %, при цьому продовжують проходити ферментативні реакції, відбувається розчинення ендосперму, накопичення низькомолекулярних продуктів розпаду крохмалю, білків, ліпідів. Друга ферментативна фаза перебігає при підвищенні температури від 45 до 70 °С, ріст та дихання припиняються, а ферментні гідролітичні процеси посилюються, вміст вологості знижується від 30 до 10 %. Третя хімічна фаза протікає при температурі 70–90 °С, ферменти частково інактивуються або переходять у зв'язаний неактивний стан. Відбувається інтенсивна взаємодія амінокислот з редуруючими цукрами і у результаті утворюються меланоїдини, які обумовлюють темний колір, специфічний присмак та аромат готового солоду. Білки коагулюють, крохмаль переходить у стан легко схильний до дії ферментів, вологість становить 3–4 % (Касперович и др., 1999).



Встановлено, що використання плазмохімічно обробленої води в процесі виробництва солоду впливає також на процес сушіння. За даними досліджень спостерігається більш швидке видалення вологи зі зернового матеріалу, внаслідок чого процес сушіння скорочується, що є важливим економічним показником. У перші чотири години сушіння температура була 40–43 °С, наступні три години вона не перевищувала 50 °С. Після 7 год. сушіння температуру підвищували до 55–60 °С, на останньому етапі – 70–85 °С. Початкова маса всіх зразків солоду становила 60 г.

У процесі сушіння за рахунок різниці утримуючої вологи поверхневих та внутрішніх шарів виникає градієнт умісту вологи. Це призводить до процесів внутрішнього тепло- і масообміну, коли відбувається переміщення вологи з внутрішніх, більш вологих шарів, до поверхневих і вже звідти відбувається її випаровування. Завдяки наявності градієнта вмісту вологи реєструється безперервне зниження вологості продукту.

На переміщення вологи всередині продукту впливає і термодифузія, яка обумовлена перепадом температур. Під її впливом волога переміщається від ділянок з більш високою температурою до ділянок з нижчою температурою. За низькотемпературного сушіння термодифузія не має істотного значення (Атаназевич, 2000; Ковальова та ін., 2011; Півоваров та ін., 2011).

Процеси внутрішнього і зовнішнього тепло- і масообміну між собою взаємопов'язані і призводять до зміни маси продукту в процесі сушіння. Аналізуючи процес сушіння солоду, можна виділити декілька періодів. У перші 15–30 хв відбувається підігрів продукту, вологість дещо змінюється. Перші шість годин процесу можна назвати періодом постійної швидкості сушіння. Він характеризується постійною швидкістю зниження вологості і температурою матеріалу. У цей період видалається переважно вільна волога, він триває до настання критичного вологовмісту ( $W_k$ ), що за результатами досліджень відповідає 6 год. сушіння. Критичний вміст вологи – це кордон між періодом постійної (1-й період) і падаючої (2-й період) швидкостями сушіння.

У періоді постійної швидкості сушіння інтенсивність процесу визначається тільки параметрами сушильного агента і не залежить від умісту вологи та фізико-хімічних властивостей продукту. У період падаючої швидкості (6–12 год.) швидкість сушіння зменшується зі зниженням умісту вологи солоду. Температура зернового матеріалу підвищується і до кінця періоду наближається до температури сушильного агента. Процес сушіння триває до досягнення рівноважного вмісту вологи, після цього її видалення припиняється. У цей період видаляється зв'язана волога, поступово знижується швидкість сушіння, що пояснюється збільшенням енергії зв'язку вологи з матеріалом; процес видалення вологості залежить від її вмісту, характеру зв'язку з матеріалом, фізико-хімічних властивостей матеріалу і параметрів сушильного агента.

Аналізуючи отримані результати, дійшли висновку, що активовані контактною нерівноважною плазмою розчини впливають не тільки на процеси адсорбції вологи, а й десорбції її зі зернового матеріалу. У підсумку сушіння амілолітична здатність світлого солоду зменшується на 25–30 % порівняно зі зеленим солодом. Група цитолітичних ферментів значно інактивується вже при температурі 60 °С протягом нетривалого терміну. Амілаза знижує свою активність, причому при сушінні за режимом для світлих солодів у меншій мірі, ніж для темних, β-амілаза втрачає активність більше, ніж α-амілаза, яка здатна переносити високі температури. Активність протеолітичних ферментів зберігається. Процес сушіння солоду скорочується при використанні активованих розчинів; найбільший ефект становить для жита – 18 % і для гороху – 27 % при активації водного розчину 15 хв. На початку процесу сушіння відзначається деяке підвищення активності ферментів, яка потім поступово знижується і в готовому солоді залишається близькою до вихідної. Під час сушіння солоду відбувається деяке зменшення кількості крохмалю, а рівень цукру з використанням активованих розчинів значно підвищується. Про підтвердження цієї гіпотези свідчать експериментальні дані, наведені в табл. 4.9.

Експериментальні дані свідчать про те, що плазмохімічно оброблена вода, проявляючи позитивну дію на ступінь замочування зерна, впливає й на амі-

лолітичну активність солоду. Підвищений ступінь замочування створює передумови для утворення ферментів і більш глибокого ферментативного гідролізу крохмалю і білків. Недостача вологості затримує дію ферментів, що несприятливо відбивається на якості солоду.

Плазмохімічно активовані розчини сприяють накопиченню амілолітичних ферментів ( $\alpha$ - та  $\beta$ -амілаз), що діють на крохмаль утворюючи цукри, які є джерелом живлення та енергії для зародка. Частина цукрів накопичується в солоді надаючи йому солодкуватого присмаку. При солододорощенні крохмаль гідролізується на 5–10 %. Отже, зі застосуванням води, обробленої контактною нерівноважною плазмою, можливо підвищити вміст цукру від 18 % для гороху і до 41 % для житнього солоду в разі активації водного розчину 15 хв, що є важливою якісною характеристикою і створює передумови подальшого впровадження досліджених процесів у виробництво солоду.

Таблиця 4.9. Дослідження вмісту цукру в солоді при використанні плазмохімічно активованої води

Культура	Час активації, хв	Цукор, %	Вологість солоду, %
Жито	0	14,5	9,0
	5	16,0	8,0
	10	17,7	8,0
	15	24,5	8,0
Горох	0	5,5	9,5
	5	6,8	9,0
	10	7,0	9,0
	15	9,0	9,0
Кукурудза	0	13,3	10,0
	5	16,2	8,5
	10	14,8	9,0
	15	16,2	8,5
Гречка	0	8,0	9,0
	5	9,0	8,0
	10	9,0	8,5
	15	9,5	8,5
Сочевиця	0	6,3	8,5
	5	8,0	8,0
	10	8,2	8,5
	15	9,2	8,0

**Екологічні аспекти розвитку та удосконалення виробництв солодової галузі.** Україна, що стала на шлях незалежності та ринкових відносин в економіці, дістала у спадок екологічний стан, який можна характеризувати як кризовий.

Недосконала структура господарства країни протягом багатьох десятиліть формувалася без урахування об'єктивних потреб населення та економічних можливостей її окремих територій. Тривалий час відбувалися структурні деформації народного господарства, коли перевага надавалася розвитку сировинно-видобувних, найбільш екологічно небезпечних галузей промисловості.

Економіці України притаманна висока питома вага ресурсномістких та енергоємних технологій, впровадження і нарощування яких здійснювали “най-дешевшим” способом – без будівництва очисних споруд. Це стосується і харчових виробництв (Домарецький, Златєв, 1993; Джигирей, 2007).

На більшості підприємств працює морально застаріле і фізично спрацьоване природоохоронне устаткування (наприклад, водоочисні споруди) або його зовсім немає, відсутні технології переробки відходів тощо. Це призводить до викидів величезної кількості забруднювальних речовин у навколишнє природне середовище, значна частина яких є небезпечними внаслідок інфільтрації токсичних компонентів у підземні й поверхневі води, рознесення вітром, тваринами та внаслідок діяльності людини (Запольський, Салюк, 2004; Запольський, Українець, 2005).

Технології виробництва харчових продуктів здебільшого характеризуються високими питомими витратами сировини, палива, енергії, води та інших природних ресурсів, що робить їх неконкурентоспроможними на міжнародному ринку. Неконтрольовані викиди забруднювальних речовин в атмосферу, водойми та ґрунти призвели до істотного забруднення їх, що стало на заваді виробництву екологічно безпечної рослинної та тваринної сировини для харчових підприємств.

Для виробництва екологічно безпечних (екологічно чистих) харчових продуктів потрібні високоякісна, екологічно безпечна сировина та високоефек-

тивні технології (Сухарев та ін., 2008). Для додержання екологічної безпеки всі процеси виробництва мають відповідати вимогам “зелених” технологій, а самі продукти мати “зелену” позначку, що свідчить про їх високу якість та екологічну безпеку. Всі відомості щодо виробництва та послуг мають бути доступними споживачеві, а споживач повинен мати право на громадський контроль виробленої харчової продукції.

Харчова промисловість споживає в основному питну воду, яку готують на міських водоочисних спорудах, іноді на самих підприємствах. Якщо взяти до уваги, що більшість водоочисних станцій використовують застарілі технології, які не забезпечують отримання води належної якості, особливо щодо вмісту розчинних домішок (нітратів, пестицидів, важких металів, хлоридів, сульфатів тощо), оскільки очищення від них не передбачається загальноприйнятою технологією, то можна стверджувати, що здебільшого для виготовлення харчових продуктів використовують воду незадовільної якості.

Унаслідок використання великої кількості води в технології виробництва харчових продуктів утворюється велика кількість забруднених стічних вод. Склад стічних вод, що утворюються на солодових заводах (табл. 4.10), забруднені, переважно органічними домішками, що є залишками сировини та продуктів її трансформації (Джигерей, 2007; Запольський та ін., 2005). Стічні води та інші відходи нині переважно викидають на територію заводів. Це призводить до забруднення підземних вод, ґрунтів та атмосферного повітря.

На багатьох підприємствах стічні води, що містять розчинні і важкорозчинні органічні сполуки, скидаються у міську каналізаційну мережу, з якої вони потрапляють на міські очисні споруди. Останні часто мають недосконалі технології і здебільшого працюють незадовільно. Тому недостатньо очищена стічна вода може потрапляти в природні водойми і завдавати великої шкоди як природним екосистемам, так і безпосередньо людям. Щоб забезпечити харчові виробництва високоякісною водою, її треба доочищати на підприємствах та заощадливо витрачати. Це передбачає застосування ощадливих технологій для промивання сировини, обладнання, тари, організацію замкнених водообігових

циклів, за яких воду після очищення та охолодження можна було б знову використовувати для технологічних процесів. На потужних підприємствах, де утворюється велика кількість стічних вод, організують локальне очищення зі застосуванням переважно біохімічного (мікробіологічного) методу. Забруднювачами стічних вод є здебільшого органічні речовини, які за допомогою мікроорганізмів у біотехнологічних процесах можуть бути трансформовані у білкові, вітамінні та інші продукти і використані в інших галузях, наприклад в аграрному виробництві (Джигерей, 2007; Запольський та ін., 2005).

Таблиця 4.10. Склад стічних вод на пивоварних й солодових заводах

Показник	Кількість
Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	250–2300
Завислі речовини, мг/дм <sup>3</sup>	30–850
Залишок після прожарювання, мг/дм <sup>3</sup>	240
Загальний азот, мг/дм <sup>3</sup>	150–270
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (фосфор), мг/дм <sup>3</sup>	30–150
K <sub>2</sub> O (калій), мг/дм <sup>3</sup>	40–64
CaO (кальцій), мг/дм <sup>3</sup>	90–134
Na <sub>2</sub> O, мг/дм <sup>3</sup>	3
Cl <sup>-</sup>	-
Окиснюваність, мг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	150–960
БСК <sub>5</sub> (біохімічне споживання кисню), мг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	300–1800
pH	6,0–7,2

У процесі виробництва солоду основну кількість води витрачають на замочування і промивання зерна. Замочувальні води включають екстрактивні речовини та сполуки кальцію і разом з промивними водами мають загальну забрудненість до 2000 мг O<sub>2</sub>/л за хімічного споживання кисню (ХСК), тоді як у каналізацію дозволено скидати стічні води з ХСК 200–300 мг O<sub>2</sub>/л. Неочищені стічні води здатні до загнивання, в процесі якого мікроорганізми виробляють молочну, масляну та оцтову кислоти, що спричиняють корозію каналізаційної мережі і гальмують процес біологічного очищення стічних вод. Тому стічні води солодового виробництва треба скидати в каналізацію у “свіжому” вигляді, до закисання. Іноді вони потребують підлугування. Загальні витрати води на

виробництві коливаються в межах від 3 до 10 м<sup>3</sup> на 1 т ячменю (Джигерей, 2007; Запольський та ін., 2005).

Під час пророщування зерна утворюються вуглекислий газ та летючі сполуки, які викидаються в атмосферне повітря. Велика кількість летючих сполук, що викидаються разом із сушильним газом в атмосферу, виділяється і в процесі сушіння солоду в сушарках. Внаслідок перебігу реакції мелаїдиноутворення між амінокислотами і цукрами утворюються альдегіди (фурфурол, оксиметилфурфурол, ізовалеріановий альдегід), які також викидаються переважно в атмосферу разом з продуктами спалювання. Інколи на деяких підприємствах відхідні гази очищують у сухих або мокрих фільтрах.

Харчова промисловість включає виробництво багатьох харчових продуктів, які повною мірою задовольняють харчовий раціон людини. Під час виробництва солоду утворюються зернові відходи, солодові ростки, їх переважно використовують як корм для тварин або кормову добавку. Останнім часом солодові ростки застосовують при виробництві оцту.

Джерелом надходження токсикантів та інших ксенобіотиків, які перевищують нормативи, є продовольча сировина або речовини, що утворюються в процесі її оброблення, а також харчові добавки, барвники та ін.

У зв'язку з кризовою екологічною ситуацією стало проблематичним вирощування високоякісної та екологічно безпечної сільськогосподарської сировини рослинного походження для виробництва продуктів харчування. До організму людини 70 % шкідливих речовин потрапляють з їжею, що потребує удосконалення технології вирощування сировини та її переробки з метою виробництва високоякісних й екологічно безпечних харчових продуктів. Комплекс заходів, спрямованих на виробництво продуктів харчування високої якості, передбачає використання високоякісної продовольчої сировини, а також супутніх матеріалів, які використовуються в процесі виробництва, зберігання, транспортування, реалізації, пакування та маркування харчової продукції. При цьому передбачається підвищення якості та поживної цінності харчових продуктів, розширення асортименту їх; збільшення виробництва продуктів дитячого і діє-

тичного харчування, продуктів профілактичного призначення, збагачених вітамінами, білковими та іншими компонентами, з підвищеною біологічною та харчовою цінністю.

Екологічно безпечні (чисті) харчові продукти мають задовольняти такі вимоги: містити необхідний набір макро- та мікроелементів, потрібних для повноцінного і збалансованого харчування людей; бути нетоксичними й не включати шкідливих домішок; мають виготовлятися по енергозберігаючих, безвідходних і маловідходних технологіях за мінімальних витрат сировини та енергії, що завдало б мінімальної шкоди довкіллю; призначатися для тривалого вжитку в процесі харчування; харчові добавки не повинні мати токсичних інгредієнтів, що призводять до неприємних та негативних наслідків для людей; не утворювати токсичних речовин і не супроводжуватися шкідливими мікробіологічними перетвореннями на всіх стадіях технологічного процесу виробництва, зберігання та споживання; мати якісні поживні властивості; мати сертифікат якості та всі необхідні відомості щодо складу продукту, його виробництва та зберігання; тара та упаковка мають бути багаторазового використання, передбачати можливість вторинного використання матеріалів або включатися в природний колообіг речовин і не впливати на якість продукції.

Для додержання екологічної безпеки виробництва всі його стадії повинні відповідати вимогам “зелених” технологій. Усі відомості щодо виробництва та послуг мають бути доступними. Споживачі повинні мати право на громадянський контроль виробленої харчової продукції.

Щоб поліпшити якість харчових продуктів, до них вводять різні біологічні добавки, які поповнюють дефіцит багатьох вітамінів, мінеральних речовин, ненасичених жирних кислот, різних видів харчових волокон тощо. Особливо корисними є полікомпонентні рослинні суміші, виготовлені з натуральної сировини: зернові й солодові концентровані екстракти, пектин, сиропи та екстракти зі сировини рослинного походження. Такі суміші сприяють нормальному травленню й виведенню з організму токсичних і канцерогенних сполук та радіонуклідів.



Солод, як основна сировина для виробництва пива, квасу й лікувально – профілактичного призначення, не повинен містити нітритів, канцерогенних і токсичних речовин, радіонуклідів і важких металів, пестицидів та інших шкідливих для організму людини хімічних речовин.

У багатьох напоях та продуктах використовують полісолодові екстракти з пророслого зерна вівса, пшениці, кукурудзи та ін. Вони багаті на вітаміни, амінокислоти, білки, ферменти, фітогормони, мінеральні та інші біологічно активні речовини. Вживання їх підвищує резистентність організму людини, поліпшує працездатність та загальний стан здоров'я.

Сучасний розвиток харчової промисловості свідчить про те, що питання виробництва, споживання і якості продукції пов'язані з питанням екологічності виробництва та екологічної безпеки продукції. Ефективний розвиток харчових та переробних підприємств неможливий без вирішення комплексу еколого – економічних проблем. З метою подолання гострої екологічної кризи потрібно здійснити екологізацію харчової та переробної промисловості.

Екологізація солодового виробництва – це поступове розширення дії екологічних пріоритетів у виробничій діяльності, підвищення екологічної освіченості та свідомості персоналу, поступове впровадження екологічних нововведень у виробництво, екологічна модернізація виробництва.

Екологізацію виробництва можна здійснювати різними шляхами (рис. 4.8).

Головним (першим) шляхом екологізації солодової промисловості є вдосконалення і модернізація технології виробництва, в тому числі викидів в атмосферне повітря, комплексне перероблення стічних вод і відходів та використання продуктів переробки як вторинної сировини, тобто трансформація забруднювальних речовин у корисні продукти.

Другий напрям екологізації виробництва полягає в очищенні викидів та стоків від забруднення, третій – це виробництво обладнання та устаткування для впровадження екологічно безпечних “зелених” технологій. Під екологічними (“зеленими”) технологіями розуміють такі, що забезпечують екологічну мо-

дернізацію та екологізацію виробництва загалом, випуск екологічно чистої (безпечної) продукції.

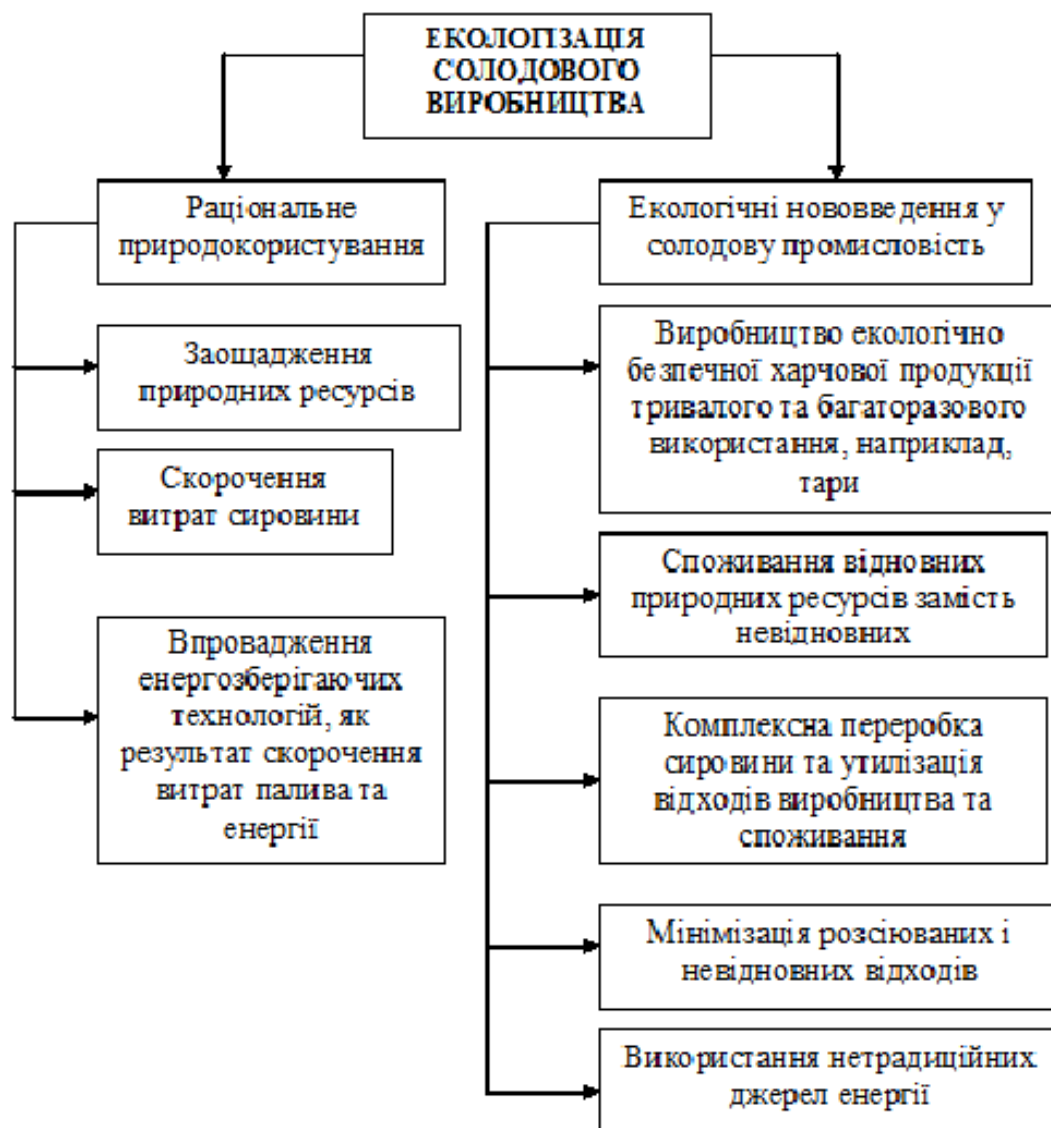


Рис. 4.8. Шляхи екологізації солодового виробництва

До головних екологічних проблем сьогодні належать: забруднення земельних ресурсів викидами з підприємств харчової промисловості, утворення звалищ з відходів виробництв; перевищення гранично допустимих скидів забруднювальних речовин у водні об'єкти, внаслідок чого порушується зона відтворення живих організмів; підвищення гранично допустимих викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря, що спричиняє забруднювання навколишнього середовища, створює небезпеку для життя і діяльності людини; зменшення відтворювальної здатності та можливостей очищення забрудників біо-

логічними ресурсами, внаслідок чого змінюється відтворювальна здатність ландшафтів, порушуються цикли біогеохімічного колообігу речовин та змінюється екологічний стан навколишнього природного середовища; порушення регіональної стабільності та працездатності населення, зниження якості виробленої продукції, що є результатом дії забруднювальних чинників.

Процес природокористування в солодовій промисловості має ґрунтуватися не лише на використанні природних ресурсів, а й на створенні можливостей їх охорони та відтворення.

Для цього необхідно створити цілісну систему природокористування, яка стимулювала б ліквідацію наслідків негативного впливу на стан навколишнього природного середовища та виробництво високоякісної екологічно безпечної для споживання харчової продукції. Модернізацію солодового виробництва потрібно здійснювати на основі системно-екологічного механізму. Під останнім розуміють процес, що відбувається між вихідним і завершальним еколого-економічним станами виробничої системи з урахуванням поставлених цілей екологічної модернізації виробництва. Отже, екологізація солодового виробництва – це процес послідовного впровадження систем технічних, управлінських та інших рішень, спрямованих на підвищення ефективності використання природних ресурсів, поліпшення якості та екологічної безпечності харчової продукції, поліпшення та збереження якості природного середовища на локальному, регіональному і глобальному рівнях.

У соціально-економічному плані екологізація спрямована на перехід від ресурсотратного принципу виробництва до ресурсозберігаючих методів переробки, відмови від екстенсивного розширеного споживання природних ресурсів, одержання максимуму користі за мінімум використаної сировини і незначного порушення середовища життя людей.

Екологізація виробництва солоду передбачає насамперед екологізацію самого технологічного процесу. Остання охоплює систему заходів щодо запобігання негативному впливу технологічних процесів на навколишнє природне середовище. Екологізацію технологій досягають завдяки впровадженню більш

ефективних технологій, оптимізації технологічних процесів і режимів, їх автоматизації та комп'ютеризації, які забезпечують мінімальні витрати сировини, енергії, палива та інших природних ресурсів за мінімуму шкідливих викидів.

Процесу екологізації солодового виробництва у харчовій промисловості повинні передусім передувати розробка програми екологізації виробництва і формування механізму природоохоронної діяльності. Серед основних завдань багато факторного процесу екологізації виробництва можна виділити: розробку теоретичної, методологічної та методичної основи екологізації солодового виробництва; створення можливостей для екологізації виробничого потенціалу підгалузей солодового виробництва (переробка побічної продукції); раціоналізацію розміщення продуктивних сил солодової промисловості з урахуванням можливостей для самовідновлення екологічного стану природного середовища; формування екологічного світогляду у працівників.

До пріоритетних напрямів екологізації солодового виробництва можна віднести: вирішення проблем регенерації солодових відходів і використання їх як вихідної сировини в інших виробництвах (комбікормове, оцтове); відходи виробництва і споживання необхідно розглядати як основні джерела палива, сировини, матеріалів; розширення комплексності використання кожного виду ресурсів; інтенсифікація розвитку солодової галузі на основі ресурсозбереження; розробка нових і вдосконалення існуючих конструкційних матеріалів, що відкривають перспективи вирішення сировинних проблем.

Уже доведено, що витрати води на виробництво солоду можуть бути зменшені на 50 % (результати Енергетичного центру Європейського союзу на заводі "Оболонь") (Джигерей, 2007; Запольський та ін., 2005). Це дасть позитивний ефект зниження рівня споживання електричної і теплової енергії. Для цього необхідно оптимізувати процес замочування, усунути витікання води і здійснити ефективне управління насосами. Подальшій економії сприятиме використання сухого механічного конвеєра для транспортування зерна. Було видано низку рекомендацій щодо оптимізації сушарки. Економія води, електроенергії і

теплоти для процесу солодощення може сягати 30 % (Джигерей, 2007; Запольський та ін., 2005).

Основними пріоритетами “зеленої” (екологічної) модернізації солодового виробництва є такі: широке впровадження у виробництво новітніх досягнень науки і техніки з метою раціонального використання природно-сировинних ресурсів; зниження рівня використання природно-ресурсного потенціалу впровадженням безвідходних і маловідходних технологій; впровадження технологій комплексної переробки сировини з підвищенням рівня і ефективності використання відходів виробництва солодової промисловості, перехід до безвідходних циклів виробництва, що забезпечить повну переробку сировини; впровадження у виробничий процес енергозберігаючих технологій з широким застосуванням нетрадиційних джерел енергії (сонячної, гідротермальної, вітрової енергії, біоенергетики).

Однією з важливих проблем підвищення екологічної ефективності роботи галузі є зменшення використання водних ресурсів та підготовка високоякісної води. Найбільшої гостроти зменшення обсягів водоспоживання набуло останнім часом. Впровадження систем зворотного водоспоживання дає можливість знизити споживання води промисловістю. Для солодового виробництва, де більшість підприємств не мають очисних споруд, для захисту водойм від забруднення стічними водами доцільно створити замкнені системи водопостачання з використанням очищених стічних вод у системі технічного і зворотного водоспоживання і забором свіжої води з джерел лише для господарсько-побутових потреб і підживлення оборотної системи.

Основна мета екологічних пріоритетів – це створення можливостей для підвищення якості та екологічності продукції, що виробляється. Використання плазмохімічного активування водних розчинів дозволить частково вирішити деякі екологічні проблеми, а можливо, за промислового застосування, і створити абсолютно екологічну технологію.

Запропонована технологія обробки зерна при солодощенні активованими водними розчинами є цілком екологічно безпечною (Півоваров та ін.,

2010; Pivovarov et al., 2011). Плазмохімічно оброблені водні розчини абсолютно не токсичні, в них відсутні складні хімічні сполуки. Стабільна активність розчину триває 7–10 діб, після цього розчин інактивується і перетворюється на просту воду. Цього часу достатньо, щоб стимулювати біохімічні процеси в зерні. Таким чином, після активації росту в зерні не залишається хімічних речовин, тобто продукція, отримана зі зерна, буде хімічно чистою, до того ж у навколишнє середовище не потраплять шкідливі хімічні сполуки.

Стічні води солодового виробництва мають схильність до закисання, тому їх досить часто підлугуюють; за рахунок запропонованої технології це виключено, оскільки активовані розчини мають початкову лужність 8–10 рН, яка перешкоджає прокисанню.

Представлена технологічна схема виробництва високоякісного “зеленого” солоду зі застосуванням плазмохімічного технологічного обладнання для обробки вихідної води, необхідної для комплексу технологічних заходів у його виробництві та стічних вод, що утворюються в процесі солододорощення (рис. 4.9).

До того ж, при використанні в якості агента зволоження розчинів хімічних сполук, на процес промивання зерна витрачається значна кількість води, а при використанні активованих розчинів промивання не потрібне, а це дозволяє скоротити витрати води в 2–3 рази (з 10 до 3–5 м<sup>3</sup>), що є позитивним результатом ефективного природокористування.

Перспективним є повторне використання технологічних розчинів. При класичній схемі повторного використання водних розчинів, їх обов’язково хлорують. В розробленій технології, використана вода збирається в спеціальній ємності, відстоюється, якщо необхідно фільтрується, а потім направляється на додаткову обробку КНП. Оброблені в такий спосіб водні розчини можуть знову застосовуватися для замочування зернового матеріалу (перше замочування), друге замочування рекомендовано проводити водою свіжою (після першої обробки КНП). Тобто схема двократного застосування: 1) замочування повторно активованими водними розчинами; 2) друге замочування – свіжою плазмохімічно обробленою водою. Обговорювана технологічна схема солододорощення до-

зволяє скоротити загальні потреби води та технологічних водних розчинів більш ніж на 50%.

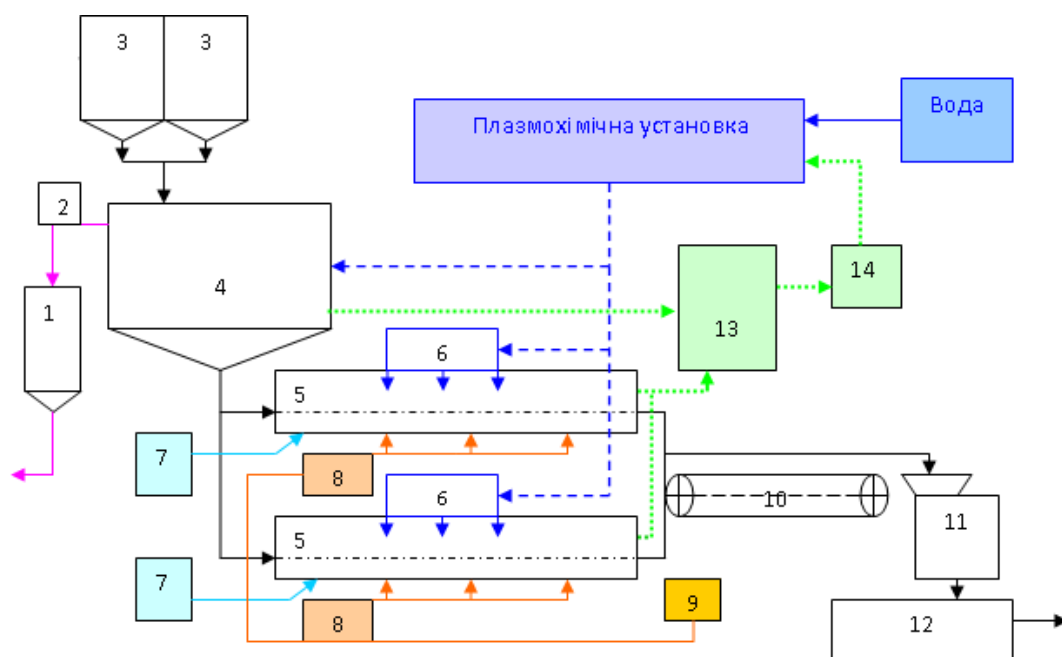


Рис. 4.9. Технологічна схема процесу солодорушення з використанням активованих водних розчинів:

1 – збірник неповноцінного зерна; 2 – приймач; 3 – бункер для очищеного та відсортованого зерна; 4 – мийний чан (мийка та дезінфекція зерна); 5 – ящична солодівня (повторне замочування, рощення, сушіння); 6 – форсунки для зволоження; 7 – установка для кондиціювання повітря; 8 – установка для підігрівання зернового матеріалу (сушіння); 9 – газонакопичувач; 10 – транспортер готового продукту; 11 – ростковідбійна машина; 12 – ваги та фасувальний апарат; 13 – накопичувач відпрацьованої рідини; 14 – фільтр.

Переміщення складових технологічного процесу:

- $\longrightarrow$  зернова сировина;
- $\longrightarrow$  неповноцінне зерно, сплав;
- $\dashrightarrow$  плазмохімічно оброблений водний розчин;
- $\longrightarrow$  повітря для кондиціювання зернової маси;
- $\longrightarrow$  гаряче повітря для сушіння пророщеного зерна;
- $\dashrightarrow$  відпрацьована вода на фільтрування та очищення.

Склад стічних вод солодових підприємств при використанні плазмохімічної активації технологічних розчинів наведений в табл. 4.11. Використовувались відповідно різні параметри активації розчинів, а саме, час обробки стічних вод в плазмохімічному реакторі.

Таблиця 4.11. Склад стічних вод на солодовому виробництві при використанні плазмохімічної активації технологічних розчинів

Показник	Контроль	Після плазмохімічної активації, час активації хв		
		10	30	60
Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	2100	720	300	100
Завислі речовини, мг/дм <sup>3</sup> :				
з фільтруванням	45	30	20	15
без фільтрування	670	300	239	176
Залишок після прожарювання, мг/дм <sup>3</sup>	240	100	75	50
Загальний азот, мг/дм <sup>3</sup>	225	95	68	45
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (фосфор), мг/дм <sup>3</sup>	80	20	15	10
K <sub>2</sub> O (калій), мг/дм <sup>3</sup>	63	16	10	5
CaO (кальцій), мг/дм <sup>3</sup>	130	25	17	10
Na <sub>2</sub> O, мг/дм <sup>3</sup>	3	1	0,9	0,5
Cl	-	-	-	-
Окиснюваність, мг O <sub>2</sub> / дм <sup>3</sup>	960	210	100	50
БСК <sub>5</sub> (біохімічне споживання кисню), мг O <sub>2</sub> / дм <sup>3</sup>	1800	150	100	50
pH	6,5	8,0	9,0	10,0

Аналізуючи дані наведені в табл. 4.11 можна зробити висновок про значну ефективність очищення стічних вод шляхом плазмохімічної активації. Якісні показники покращились, а рівень забруднення зменшився в 2-3 рази, що дає можливість рекомендувати використання плазмохімічної активації як перспективного інноваційного технологічного рішення на солодових підприємствах.



## **Висновки**

Використання активованої води дозволяє отримати пивоварний солод більш високої якості, в більш короткі терміни та без домішок будь-яких принесених хімічних речовин та антисептиків по екологічно безпечній технології. Плазмохімічно активована вода сприяє скороченню часу промислового пророщування зернового матеріалу, чим значно здешевлює та удосконалює технологічний процес. Рекомендоване застосування представленої технології на підприємствах солодової галузі, в якості заходів з підвищення продуктивності солодоростильних цехів. Активована вода є антисептиком процесу солодорушення, відмічена її здатність протистояти пліснявоутворенню та грибковим мікроорганізмам. Досліджені та охарактеризовані екологічні особливості плазмохімічної активації технологічних розчинів в процесі солодорушення.

## **Розділ 5. РОЗРОБКА НОВИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПРОДУКТІВ ХАРЧОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

### **5.1. Стан і перспективи виробництва функціональних харчових продуктів та їх роль у життєдіяльності організму людини**

За даними досліджень в останні десятиліття більшість населення європейських країн, у тому числі й України, у раціоні споживають переважно продукти промислового виробництва. Серед таких продуктів центральне місце посідають кондитерські вироби. За насиченістю та асортиментом ринок кондитерських виробів України наближається до рівня європейських країн, асортиментний склад яких налічує приблизно 2300–3000 од. Кондитерські вироби України включають близько 2000 найменувань. Понад 90 % ринку солодощів належить вітчизняній продукції. В Україні їх виготовляють понад 800 підприємств. Основними виробниками українського внутрішнього кондитерського ринку є ПАТ “ВО “Конті”, ПАТ “ККФ “Roshen”, ПАТ “КФ “АВК”, корпорація “Бісквіт-Шоколад”, ЗАТ “Житомирські ласощі” та ін. Зміни в раціоні харчування та харчові звички призводять до того, що все більше дорослих та дітей харчуються не вдома та споживають їжу, яка перенасичена калоріями, цукром та жирами. Це значною мірою призводить до поширення несприятливих чинників способу життя і підвищення ризиків надлишкової маси тіла та ожиріння.

Неприпустимо низьким стає рівень освіти населення з питань раціонального харчування та обізнаності громадян України щодо ризиків розвитку неінфекційних хронічних хвороб, які пов’язані із нераціональним харчуванням. Економічна обмеженість населення в натуральних харчових продуктів, зміна харчових звичок, зниження якості продуктів уже провокують істотні якісні зміни у раціоні харчування всіх верств населення. Унаслідок цього підприємства мають динамічно вирішувати питання оцінки стратегії своєї поведінки не лише сьогодні, але й у перспективі, а також спостерігати за ситуацією потреб населення у сфері здорового харчування. Процеси

глобалізації, що відбуваються у сфері забезпечення населення продуктами харчування, а також перетворення в умовах економічної кризи якості харчових продуктів на категорію суто економічну створюють серйозні проблеми у харчуванні населення. Це призводить до розвитку так званого "прихованого голоду", тобто дефіциту мікронутрієнтів – мінеральних речовин і вітамінів.

Із формуванням культури їжі ми маємо поняття таких страв, як закуски, перші, основні, салати, десерти, кондитерські вироби. Аналіз цих страв за харчових показників цих страв свідчить про те, що найбільший вміст цукру та найменший вміст вітамінів, макро- та мікроелементів знаходиться в кондитерських виробах. Велика частина населення України, особливо молодь та діти, із задоволенням вживають солодощі у вигляді цукерок, тортів, печива й таке інше. Ця продукція представлена великою групою виробів, різноманітною за своїм асортиментом, зовнішнім виглядом, ароматом та смаком. Основною сировиною в кондитерських виробах є борошно, цукор, жири, ячні та молочні продукти. Цукерки, багаті на вуглеводи, за рахунок умісту в них цукру, жирів та інших інгредієнтів з високою енергетичною цінністю. Більшість видів цукерок характеризуються як бідні на вітаміни та біологічно активні речовини, їх відсутність в основній сировині або руйнація під дією високих температур у процесі виробництва (Калина, Олійник, 2019).

### **5.1.1. Хімічний склад та технологічні властивості інгредієнтного складу функціональних продуктів**

*Макаронні вироби на основі клітковини гречаної.* В останнє десятиліття перед макаронною промисловістю гостро постала проблема підвищення якості продукції за рахунок ефективних способів переробки борошна хлібопекарського та макаронного зі зниженими технологічними властивостями, підвищення харчової цінності та розширення асортименту виробів, зокрема профілактичного призначення. Актуальність проблеми зумовлена тим, що нині для виготовлення макаронних виробів на підприємствах галузі використовується виключно хлібопекарське борошно, яке не забезпечує високої якості продукції. Відсут-

ність макаронного борошна є наслідком недостатнього виробництва твердих пшениць та високої ціни на них (Гордієнко, 2012). Введення у 1999 році в дію нового стандарту на хлібопекарське борошно, яким затверджені занижені вимоги до показників його якості, ще більше позначається на ситуації. Ще однією причиною зниження якості макаронних виробів є створення великої кількості малих підприємств, оснащених недосконалими технікою і технологією.

Сьогодні макарони та макаронні вироби перетворилися для населення в один з основних продуктів харчування, за суттю – третій за значимістю після хліба та молока. Споживання макаронних виробів людиною в Україні становить від 10 до 15 кг на рік (Білічук, 2008).

Макаронні вироби – це особлива група зерноборошняних товарів, що доступна за ціною, добре знайома покупцям і налічує безліч прихильників серед населення. Асортимент макаронних виробів дуже широкий, але його різноманіття залежить від якості борошна, технічного обладнання виробництв, присутності рецептурних інгредієнтів, наявності пакувальних матеріалів. Асортимент налічує до 30 найменувань одночасно. Він може розширюватися за рахунок різноманітної форми виробів (Manthey, Yalla, 2007).

Велике значення для макаронних виробів мають їх споживні властивості, які визначаються насамперед їх хімічним складом. Вони характеризуються високою харчовою цінністю, яка обумовлена складовими пшеничного борошна, різними збагачувачами, передусім яечними та молочними продуктами. Найбільш цінними речовинами, що входять до складу макаронних виробів, є білки та вуглеводи, завдяки яким вироби мають високу енергетичну цінність (Осипова, Корячкина, 2010).

Високоякісні макаронні вироби можна зробити лише зі спеціального борошна, яке виробляють з твердої пшениці. Протягом останніх років дефіцит такого борошна значно зріс, тому у виробництві макаронних виробів використовують борошно, властивості якого не відповідають технологічним вимогам. Вітчизняні макаронні вироби з цієї причини не можуть конкурувати з імпортними

(з Італії, Польщі, Туреччини, Швейцарії, Франції) ні за якістю, ні за оформленням товару (Gallegos-Infante, Rocha-Guzman, 2010).

Питання правильного та здорового харчування є актуальним для українців. На ринку ми можемо бачити великий асортимент макарон, які представлені різними виробниками, але серед цього великого асортименту ми повинні вибрати якісний продукт. Саме тому важливо досліджувати технологію виробництва, основні сировинні матеріали, щоб визначити якість та споживчу цінність макаронних виробів.

Виготовлення високоякісних макаронних виробів є основною метою діяльності спеціалізованих харчових підприємств. Також посилення позиції на ринку вітчизняних макаронних виробів шляхом розширення асортиментного ряду, збільшення випуску виробів підвищеної харчової та біологічної цінності.

Першочерговим завданням в одержанні функціональних макаронних виробів є підвищення їх біологічної цінності за рахунок білка та харчових волокон. Науковцями проводяться дослідження з використанням борошна амаранту, кіноа та гречихи для створення безглютенових макаронних виробів.

Додавання гречаного борошна до макаронних виробів збільшує вміст корисних речовин у п'ять разів: мінеральних сполук – залізо, фосфор, цинк, кальцій; деяких кислот, що беруть важливу участь в травних процесах – яблучна, лимонна та щавлева; вітамінів – В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>9</sub>, ніацин та токофероли. Для людського організму ці речовини вкрай необхідні, зокрема в нормалізації обміну речовин. Гречка, на відміну від більшості злакових культур, не містить у своєму складі глютену (клейковини), тому може повноцінно замінювати продукти з пшениці, ячменю, вівса в раціоні людини, які мають непереносимість глютену (Schoenlechner et al., 2010).

Ряд підприємств малої потужності виготовляють макаронні вироби з умістом пшеничних висівок, ячмінного солоду, цільозернового борошна (Yurchak, Karpyk, 2013). Але викладені способи отримання макаронних виробів не знайшли широкого використання в промисловості.

Нами пропонується створити макаронні вироби з оздоровчими властивостями шляхом додавання клітковини гречаної, які стануть на новий рівень у харчовій промисловості і зможуть задовольнити потреби усіх верств населення. Адже до складу насіння гречки входить велика кількість білка, що характерно для всіх круп'яних культур. Особливість гречаних білків полягає у вмісті підвищеної кількості амінокислот – лізину та метіоніну, що легко засвоюються організмом людини. Засвоюваність білків гречаної крупи становить приблизно 78 %, що вище, ніж у пшениці та вівса (Пат. 85869. Україна ..., 2013).

Гречану клітковину одержують з оболонки гречки, що є побічним продуктом у круп'яному виробництві. Отже, отримання гречаної клітковини сприятиме безвідходному виробництву крупи з гречки та збільшить асортимент макаронного виробництва (Пат. 83998. Україна ..., 2013).

Ученими встановлено, що добова норма вживання клітковини 30 г. Використання продуктів, що містять клітковину, значно впливають на нормалізацію функціонування шлунково-кишкового тракту та його очищення. Клітковина не розщеплюється і не піддається травленню. При вживанні клітковини травний тракт швидко звільняється від неперетравлених решток їжі. Клітковина впливає на приведення в норму обмінних процесів, знижує рівень холестерину і, навпаки, зростання кількості інсуліну в кров'яному руслі. Клітковину використовують в боротьбі з надлишковою масою тіла, оскільки клітковина збільшується в об'ємі, а отже, швидко насичує організм людини (Юдина, 2008).

*Фруктово-овочеві гранули в системі натрію альгінат-кальцію фосфат.* Сьогодні одним із пріоритетів виробництва харчових продуктів є покращення структури харчування населення за рахунок збільшення споживання продуктів з високим вмістом вітамінів, особливо в зимовий період часу. Таке фізіологічне підґрунтя ставить перед науковцями практичні задачі щодо створення нових технологій продукції, яка дозволить раціоналізувати, зробити більш повноцінним харчування населення.

Одержання гранульованих напівфабрикатів на основі альгінату натрію з використанням сезонної фруктово-овочевої сировини може знайти широке за-

стосування в харчовій технології та кулінарії. Як структуроутворювач використовують розчин альгілату натрію, екструзія якого до спеціально розробленого формуючого середовища дозволяє одержувати гранули діаметром 2–9 мм. Викладене підтверджує, що розробка нових технологій гранулювання з використанням альгілату натрію є актуальним та своєчасним завданням, вирішення якого дозволить розробити технології гранульованих продуктів з новими споживними властивостями; збільшити галузь знань у створенні структурованих продуктів харчування; розширити асортимент кулінарної продукції закладів ресторанного господарства.

Альгілат натрію – це природний гідрофільний колоїд, одержаний із коричневих водоростей роду *Laminaria* і *Macrocectis*. Здатність альгілатів формувати однорідні розчини з різними властивостями, створювати стійкі до нагрівання й охолодження гелі робить цю речовину ефективною у виробництві різної продукції (Пестина, 2009).

Споживання альгілатів покращує здоров'я людини шляхом зменшення часу на розщеплення їжі в кишечнику, позитивного впливу на його мікрофлору, поліпшення бар'єрної функції слизової оболонки кишечника. Альгілат належить до розчинних харчових волокон, у результаті його засвоєння знижується рівень глюкози й холестеролу крові. Крім того, споживання альгілатів надає відчуття насиченості і таким чином знижує відчуття голоду. Альгілати сприяють виведенню радіонуклідів Sr й Cs з організму, зменшують рівень Na, що нормалізує артеріальний тиск. Унікальною властивістю альгілатів є їх здатність утворювати термостабільні драгли, що виникають за кімнатної температури внаслідок взаємодії  $\text{Ca}^{2+}$  й натрію альгілат у кислому середовищі (Полумбрик та ін., 2014).

Утворення структури гелю в розчинах альгілатів відбувається за участі іонів кальцію шляхом взаємодії їх молекул між собою в зонах кристалічності. У зв'язку з цим гелеутворююча здатність і міцність гелів безпосередньо пов'язані з кількістю і довжиною зон кристалічності. Формування впорядкованої структури відбувається за рахунок створення зон асоціацій між окремими ланцюгами

макромолекул полісахариду. Завдяки іонотропному механізму формування альгінові гелі характеризуються термостабільними властивостями (Пивоваров та ін., 2010).

Досвід використання альгінату натрію в Україні відображається в реалізації новітніх технологій одержання імітованої ікри осетрових та лососевих порід риб, а також реструктурованих харчових продуктів із дині, грибів, тощо (Гринченко, 2007; Рябець, 2008).

Нами розроблено технологію гранульованих продуктів з використанням дистильованої води і експериментально встановлено стабільні співвідношення рецептурних компонентів (Калина та ін., 2010). Мета нашого дослідження полягала в розробці технології гранульованих напівфабрикатів у системі натрію альгінат – трикальцію фосфат з використанням сезонної плодово-ягідної та овочевої сировини (соків), які можуть знайти широке застосування в технології кулінарної продукції. Створення гранульованих продуктів дозволить суттєво розширити асортимент десертної продукції та збільшити її харчову цінність.

*Кремowo-збивні цукерки, збагачені бджолиним обніжжям.* Для підприємств харчової промисловості актуальною залишається задача розширення сировинної бази за рахунок виявлення альтернативної сировини. Вивченню особливостей діяльності підприємств кондитерської галузі та розвитку ринку кондитерських виробів в Україні значну увагу приділяли у своїх працях багато вчених-технологів.

Наукова література підтверджує, що бджолине обніжжя має унікальний хімічний склад. Він містить бета-каротин, вітаміни А, В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>5</sub>, В<sub>6</sub>, В<sub>9</sub>, С, Е, Н, РР, а також мікро- і макроелементи, необхідні організму калій, кальцій, магній, цинк, мідь, залізо, хлор, сірка, фосфор і натрій. Білок, що міститься у бджолиному обніжжі, легко засвоюється і включає практично всі амінокислоти, в тому числі і незамінні жирні кислоти, без яких неможливе будівництво клітин організму. Вживання бджолиного обніжжя сприяє зниженню рівня «поганого» холестерину в крові, стимулює обмінні процеси організму, зміцнює стінки судин і підвищує їх еластичність. У бджолиному обніжжі медики виявили натуральний



антибіотик, який суттєво уповільнює ріст злоякісних клітин. Бджолине обніжжя покращує склад крові і сприяє підвищенню рівня гемоглобіну; воно вважається корисним для тих, хто має проблеми з кровотворенням. Застосування протягом місяця пилкового обніжжя у хворих із залізодефіцитними анеміями різного генезу і В<sub>12</sub>-дефіцитними анеміями покращувало утилізацію заліза (особливо до кінця третього тижня) порівняно з групою хворих, які отримували тільки звичайну терапію (Мачекас, Астрадаускене, 1988).

У квітковому пилку виявлено ферменти (до 50), у тому числі амілаза, інвертаза, фосфатаза, каталаза, пероксидаза, фосфорилаза, трегалаза та інші. Антиоксидантні властивості пояснюються наявністю вітаміну Е, каротиноїдів, вітаміну С. Стимуляція регенерації пояснюється присутністю вітамінів А, В<sub>1</sub>, Е і фолієвої кислоти, яка збільшує синтез нуклеїнових кислот (Кадзяускене та ін., 1990). Оскільки обніжжя складається з пилкових зерен, змочених нектаром або медом, то за хімічним складом, воно являє собою суміш речовин рослинно-тваринного походження.

Мета нашого дослідження полягала в збагаченні хімічного складу – збивних цукерок “Пташине молоко” шляхом збільшення вітамінно-мінерального складу, що відіграють важливу роль в організмі людини.

Для визначення кількісного вмісту мінеральних елементів у бджолиному обніжжі різного ботанічного походження проведено його порівняльну характеристику (табл. 5.1).

Бджолине обніжжя різних видів рослин характеризується значними коливаннями вмісту мінеральних елементів залежно від ботанічного походження. Види рослин з підвищеною кількістю калію і фосфору – з конюшини, бобів кормових, гречки, гіркокаштану, маку дикого; заліза і цинку – з фацелії, конюшини. Найбільша кількість кальцію, магнію та фосфору виявлена в обніжжі бобів кормових.

Залежно від ботанічного походження встановлено пріоритетні види медоносних рослин, бджолине обніжжя з яких доцільно використовувати. Обніжжя конюшини лучної, кормових бобів та гіркокаштана має підвищений вміст

важливих для організму людини сполук, що робить його особливо цінним серед інших (Калина, Олійник, 2018).

Таблиця 5.1 Вміст мінеральних елементів у бджолиному обніжжі різного ботанічного походження, мг/кг повітряно-сухої речовини

Елемент	Рослина							
	конюшина лучна	гіркокаштан	фацелія	кульбаба	соняшник	мак дикий	гречка	боби кормові
K	7829,0	7094,0	5969,0	1544,0	4633,0	6804,0	6004,0	7985,0
Ca	1486,0	1368,0	1109,0	1591,0	379,0	1856,0	1479,0	1862,0
Mg	949,0	992,0	610,0	193,0	642,0	1749,0	1247,0	2189,0
Fe	97,5	65,2	64,4	44,1	53,7	65,0	66,0	69,0
Na	35,8	65,8	65,2	48,4	59,1	70,9	63,9	68,0
Zn	42,1	51,4	46,6	22,2	43,0	35,9	38,1	41,5
Mn	26,8	40,4	34,3	6,4	22,1	20,4	29,8	22,0
Cu	7,07	21,4	4,59	4,87	5,16	7,45	10,85	7,62
Mo	0,35	0,79	0,28	0,12	0,15	0,26	0,19	0,09
Co	0,022	0,023	0,019	0,024	0,016	0,064	0,056	0,092
P	2436,0	2337,0	2239,0	1006,0	1967,0	2516,0	2454,0	2671,0

*Шоколадні тістечка на основі бобової культури – нут.* Тривалістю тисячоліть істотно змінювалося споживання європейцями окремих харчових речовин. Споживання білків істотно зменшилось зі 170–200 до 100 г/добу, того часу як споживання жирів і цукру збільшилось. За даними науковців, нині людині потрібно збільшити вживання клітковини (складних вуглеводів) і зменшити споживання цукру (простих вуглеводів).

Із формуванням культури їжі ми поділяємо страви на закуски, перші, основні, салати, десерти. Проаналізувавши ці страви за поживною цінністю, можна зробити висновок: більший вміст цукру знаходиться в десертах. З цього формується ідея, створити продукт, який за вмістом цукру буде відповідати нормі 35 г/добу, з високим умістом клітковини та низьким глікемічним індексом (Смоляр, 2013).

Шоколадне тістечко «Брауні» запропоновано шеф-кухарем легендарного готелю «Palmer» в Чикаго в 1893 році. Це тістечко печуть там й донині за тим самим оригінальним рецептом. Із тих часів це один із найбільш відомих і популярних десертів у світі. В Україні десерт «Брауні» швидко набув популярності та користується великим попитом у всіх верств населення, особливо його любляють діти. Однак недоліком рецептури відомого десерту «Шоколадний Брауні Безглютенний» є високий вміст цукру та низький вміст клітковини, десерт не забезпечує достатній вміст мінеральних речовин, вітамінів та незамінних амінокислот: лізину, лейцину, ізoleyцину (Пат. 118883. Україна ..., 2017).

Для підприємств харчової промисловості актуальною є задача розширення сировинної бази борошна за рахунок виявлення альтернативної сировини, яка здатна повністю або частково замінити пшеничне борошно на інші його види з метою збагачення хімічного складу харчового продукту (Неміріч та ін., 2018). Інноваційна стратегічна технологія виготовлення бісквітного десерту «Брауні» функціонального призначення полягає в повній заміні основної сировини – пшеничного борошна на бобову культуру – нут та цукор на цукрозамінник – фруктозу і слугує вдалим прикладом удосконалення рецептури солодких страв.

Як відомо з літературних джерел, що боби нуту містять білки, жири, клітковину, велику кількість мінералів, вітамінів та інших речовин. У нуті дуже мало калорій – 120 ккал/100 г. Наявність у нуті комплексу вітамінів та мікроелементів свідчить про його цілковиту придатність навіть для дитячого та дієтичного харчування. У складі нуту міститься велика кількість калію і кальцію, а також селену. Ці елементи впливають на регуляцію кровотворення і запобігають розвитку багатьох хвороб, зокрема й онкологічних. Застосування нуту в харчуванні сприяє також лікуванню ендокринних порушень, аритмії серця, нервових хвороб, розчиненню утворень у жовчному і сечовому міхурах, нормалізації артеріального тиску, зміцненню серцевого м'яза, підвищенню еластичності судин.

Порівняння амінокислотного складу бобових культур та яєчних продуктів свідчить про те, що за біологічною цінністю білка нуту наближені до білку яєць, а саме 17 амінокислот, у тому числі 9 незамінних: аргінін, трионін, валін, метіонін, лейцин, ізолейцин, фенілаланін, гістидин і лізин. У кількісному співвідношенні серед незамінних амінокислот переважають лейцин (0,47 мг/г) і лізин (0,77 мг/г). Білок нуту за амінокислотним складом наближається до ідеального за ФАО, тому ця культура може бути добрим заміником м'яса в переробній промисловості (Рогова, Положишников, 2011).

Цукрозамінник – фруктоза – це природний моносахарид, має рослинне походження і міститься у фруктах, а також у деяких овочах і в меді. Його вплив на людський організм порівняно з глюкозою можна назвати більш м'яким і щадним. Так, потрапляючи в шлунково-кишковий тракт, продукти, що містять фруктозу, не викликають інтенсивного утворення інсуліну. Фруктоза не провокує карієсу, саме з цієї причини її використовують у складі жувальної гумки. Серед переваг фруктози слід назвати її здатність після попадання в печінку трансформуватися в глікоген – полісахарид, який відповідає за тонус м'язів. Його присутність в організмі дозволяє позбутися від фізичної втоми, тому фруктоза дуже корисна для людей, які ведуть активний спосіб життя або постійно відчують підвищені фізичні навантаження. Введення в раціон згаданих продуктів покращує роботу нервової системи, захищає серцево-судинну систему, зміцнює організм і регулює обмінні процеси (Дорохович, 2000).

Висновком із проаналізованих джерел є виявлення функціонально-технологічного потенціалу заміни пшеничного борошна на нут та цукру на фруктозу з метою створення оздоровчого функціонального продукту. Це продукти, які, не порушуючи збалансованість раціону, містять гарантовану оптимальну кількість речовин для підвищення опірності організму до шкідливої дії навколишнього середовища, обмежують накопичення токсинів та прискорюють їх виведення з організму.

Виготовлення харчових продуктів оздоровчого призначення є основною метою діяльності спеціалізованих харчових підприємств, а також посилення

позицій на ринку вітчизняних кондитерських тістечок шляхом розширення асортиментного ряду, збільшення випуску виробів підвищеної харчової та біологічної цінності.

Тому й була поставлена задача удосконалити найпопулярніший десерт у світі – шоколадне тістечко «Брауні», тобто створити десерт “БрауНут” з оздоровчими властивостями, який за вмістом цукру відповідатиме денній нормі (35 г/добу), з високим умістом клітковини та низьким глікемічним індексом шляхом заміни пшеничного борошна на бобову культуру – нут та цукру на цукрозамінник – фруктозу.

Для визначення кількісного вмісту мінеральних елементів та амінокислот у пшениці і нуті проведено його порівняльну характеристику (табл. 5.2) (Калина, Дмитрієва, 2018; Якубко, Ешкайт, 1985).

Таблиця 5.2 Вміст мінеральних речовин і незамінних амінокислот у нуті та пшениці, мг/100 г продукту

Культура	Мінеральна речовина					Амінокислота		
	P	Ca	Mg	Fe	Zn	лізин	метіонін	триптофан
Пшениця	410	60	126	6	0	300	120	80
Нут	444	193	180	7	3	1539	340	220

Нут значно переважає за вмістом усіх корисних речовин порівняно з пшеницею.

Оскільки нут використовували для збагачення тістечок амінокислотами та білками, то було розраховано білковий скор у розробленому десерті (67,42 %). Узагалі денна норма білка для людини становить 47 %, отже, одержаний показник нового продукту може задовольнити денну норму споживання білка. Для зниження глікемічного індексу тістечок використовували фруктозу, у результаті чого розраховано показник, що становить 31. У підсумку розроблений десерт можна віднести до третьої категорії продуктів з низьким показником глікемічного індексу (49 і менше).

Глікемічний індекс – це важливий показник, який враховують під час складання дієт для людей з цукровим діабетом та надлишковою вагою. Повільне засвоєння їжі, поступові підйом і зниження рівня цукру в крові за низького глікемічного індексу допомагають людям з діабетом контролювати концентрацію глюкози в крові. До переваг низького показника належать постійне поширення глюкози по організму протягом дня; зниження апетиту; низька швидкість концентрації глюкози, що перешкоджає утворенню запасам жиру (Дорохович, 2010).

Нутове борошно як інгредієнт розширення асортименту кондитерських виробів. Критичний стан навколишнього середовища, збільшення населення планети та високі темпи зростання його потреб, у першу чергу в продуктах харчування, вимагають від виробників упровадження широкого асортименту конкурентоспроможної продукції з високими споживними властивостями. Крім того, у наш час, коли особливого значення набуває екологічна небезпека, організм людини не здатен самостійно чинити опір дії зовнішніх факторів, унаслідок чого виникають порушення в роботі окремих органів і організму в цілому (Коршунова, Саєнко, 2014).

У раціоні сучасної людини значне місце займають вироби з борошна, що споживаються людиною тривалістю усього життя. Тому зміни хімічного складу цих виробів дають можливість створювати продукти харчування зі заданими смаковими якостями, певними властивостями, що є нині одним із пріоритетних завдань сьогодення.

У виробництві борошняних виробів усе частіше пропонуються технології, які передбачають застосування різних видів борошна з рослинної сировини. До переваг їх використання при виготовленні борошняних виробів належать підвищення харчової цінності, скорочення тривалості технологічного процесу, розширення асортименту, стабільність якості та збільшення термінів зберігання.

Для одержання борошняних виробів високої якості використовують багатофункціональні добавки з вітчизняної рослинної сировини. Серед цих добавок зустрічається борошно з бобів нуто. У ньому міститься величезна кількість бе-

та-каротину, вітамінів А, В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>5</sub>, В<sub>6</sub>, В<sub>9</sub>, С, Е, К, РР, особливо багато вітаміну Е (головного антиоксиданту серед вітамінів).

Додавання борошна з бобів нуту до харчових продуктів сприяє збагаченню виробів харчовими волокнами і комплексом таких мікроелементів, як: калій, кальцій, магній, цинк, селен, мідь, марганець, залізо, хлор, сірка, йод, молібден, бор, ванадій, олово, титан, кремній, кобальт, фосфор, натрій (Калина та ін., 2019).

Функціональні продукти харчування – це продукти, призначені для систематичного споживання у складі харчових раціонів усіма віковими групами здорового населення, знижують ризик розвитку захворювань, пов'язаних з харчуванням, за рахунок наявних у них функціональних харчових інгредієнтів. Збагаченим харчовим продуктом називають продукт, що отримують додаванням одного або декількох фізіологічних функціональних харчових інгредієнтів до традиційних харчових продуктів з метою запобігання виникнення або виправлення наявного дефіциту поживних речовин в організмі людини (Дзюндзя, 2016).

Кекс по суті являє собою солодкий хліб, тобто пиріг, до складу тіста якого (традиційно воно бісквітне, рідше дріжджове) входять вода, яйця, маргарин, цукор, може бути також сіль, масло; найпопулярнішими є родзинки, горіхи, цукати.

Продукт, подібний до кексів відомий ще з часів Давнього Риму. Особливої популярності кекси набули за Середньовіччя в Англії та Німеччині (Іншакова, Стахова, 2018).

Інформація з наукової літератури та патентного огляду свідчить про те, що боби нуту містять білки, жири, клітковину, велику кількість мінералів, вітамінів та інших речовин. У нуті вельми мало калорій – 120 ккал/100 г. Наявність у нуті комплексу вітамінів та мікроелементів робить його цілком придатним навіть для дитячого та дієтичного харчування. У складі культури міститься велика кількість калію, кальцію, селену. Ці елементи впливають на регуляцію кровотворення і запобігають розвитку багатьох хвороб, зокрема й онкологіч-

них. Застосування нуту в харчуванні сприяє лікуванню ендокринних порушень, аритмії серця, нервових хвороб, розчиненню утворень у жовчному і сечовому міхурах, нормалізації артеріального тиску, зміцненню серцевого м'яза, підвищенню еластичності судин (Смоляр, 2013).

Порівняння амінокислотного складу бобових культур та яєчних продуктів свідчить, що за біологічною цінністю білки нуту наближені до білка яєць, а мають 17 амінокислот, у тому числі 9 незамінних: аргінін, трионін, валін, метіонін, лейцин, ізолейцин, фенілаланін, гістидин і лізин. У кількісному співвідношенні серед незамінних амінокислот переважають лейцин (0,47 мг/г) і лізин (0,77 мг/г). Білок нуту за амінокислотним складом наближається до ідеального за ФАО, тому ця культура може бути добрим заміником м'яса у переробній промисловості.

Борошняні кондитерські вироби врізноманітнюють внесенням в рецептуру різних добавок. За останні п'ять років в Україні виробництво борошняних кондитерських виробів збільшилося на 48 %. Дана група виробів має низьку біологічну цінність та потребує збагачення біологічно активними речовинами, необхідними для нормального функціонування організму людини (макро- та мікроелементами, вітамінами, поліненасиченими жирними кислотами, клітковиною тощо), що викликано збідненням загального раціону сучасної людини, погіршенням екологічних умов, підвищенням психоемоційного навантаження і зумовлює зниження резистентності організму до негативних зовнішніх чинників.

Сировина рослинного походження – джерело біологічно активних речовин, які знаходяться в ній у найбільш засвоєваних організмом співвідношеннях. Особливого значення набуває використання дикорослих ягід, які містять у своєму складі, крім вітамінів та мінеральних речовин, біофлавоноїди, Р-вітамінні речовини, що надають забарвлення ягодам від червоного до темно-фіолетового кольору та володіють антиоксидантними і імуномодельючими властивостями. Однією з таких ягід є журавлина. За даними вчених, журавлина вважається однією з найбільш корисних для людини ягід, тому для підвищення



харчової та біологічної цінності виробів доречним є додавання ягід журавлини, що збагачені вітамінами та мікроелементами (Хомич, 2017).

Журавлина – вічнозелена рослина з маленьким листям та темно-червоними, соковитими, кислими на смак ягодами. Вона містить такі важливі мікроелементи, як фосфор, калій, кальцій, марганець, залізо, кобальт та йод. У великій кількості містяться вітаміни С (30 мг), Р (0,1 мг), В<sub>1</sub> (0,03 мг), В<sub>2</sub> (0,02 мг), багато урсолової кислоти, яка генетично і за структурою близька до багатьох фізіологічно важливих гормонів.

Найважливішими компонентами журавлини є органічні кислоти (2–5 %) та цукри (3–4 %). Основними кислотами є яблучна, хінінова та лимонна (2,4–3,3 %). Особлива роль належить бензойній кислоті, яка володіє антисептичними властивостями. Цукри представлені в основному глюкозою (2,4 %) та фруктозою (0,3%). Крім того, в ягодах міститься пектин (0,7–1 %).

Журавлина є однією з найбільш корисних ягід лісу. Доведено, що ягоди журавлини містять велику кількість антиоксидантів – речовин, здатних поглинати в організмі шкідливу дію вільних радикалів. Давно відомо, що антиоксиданти борються з першими ознаками старіння шкіри. Крім того, щоденне споживання стакану журавлинового соку або сиропу назавжди позбавляє від “шкідливого холестерину”.

Висновком із проаналізованих джерел є виявлення функціонально-технологічного потенціалу заміни пшеничного борошна на нутове та додавання ягоди журавлини з метою створення оздоровчого функціонального продукту. Згадані продукти, не порушуючи збалансованості раціону, містять гарантовану оптимальну кількість речовин для підвищення опірності організму до шкідливої дії навколишнього середовища, обмежують накопичення токсинів та прискорюють їх виведення з організму.

Виготовлення кексів з підвищеною харчовою цінністю шляхом заміни пшеничного борошна на нутове та додавання ягід журавлини, які містять у своєму складі поживні речовини, як показали дослідження, добре впливають на здоров'я людини.

Для визначення хімічного складу борошна з пшениці і нуту нами проведено його порівняльну характеристику (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 Хімічний склад борошна з бобів нуту та пшеничного в/г

Найменування	Вміст у 100 г продукту	
	борошно пшеничне	борошно нутове
Білки	10,3	20,0
Жири	1,1	2,29
Вуглеводи	76,0	58,0
Клітковина	3,0	4,0
Зола	0,5	2,36
Нейтральні ліпіди	1,08	4,5
Мінеральні речовини, мг		
Кальцій	18,0	246,0
Фосфор	86,0	383,0
Магній	16,0	125,0
Залізо	1,2	2,5
Натрій	3,0	70,0
Калій	122,0	932,0
Хлор	20,0	46,0
Марганець	0,6	2,1
Цинк	0,7	2,8
Мідь	100,0	648,0
Вітаміни, мг		
B <sub>1</sub>	0,57	0,51
B <sub>2</sub>	0,44	0,16
B <sub>6</sub>	-	0,55
PP	1,20	2,25
E	2,57	8,33
A	-	0,19
C	-	3,87

Отримані дані підтверджують, що порівняно з пшеничним хімічний склад нутового борошна є більш поживним. Він містить, у переважній кількості необхідні для повноцінного розвитку організму людини кальцій, фосфор, магній, які сприяють нормальному функціонуванню серцево-судинної системи, нервової системи, профілактиці при дерматиті, аутизмі, синдромі дефіциту уваги (Скурин, Волгарев, 1987).

Усі відомі мінеральні речовини, які є в харчових продуктах, поділяють на дві групи: макро- та мікроелементи, які виконують певні функції в організмі людини:

- пластичну – беруть участь у побудові тканин організму (особливо кісткової);
- каталітичну – беруть участь у структурі та функціонуванні більшості ферментних процесів, які відбуваються в організмі;
- регуляторну – підтримують кислотно-лужну рівновагу, хімічний склад крові організму людини, нормалізують водно-мінеральний обмін.

Продукти харчування для людей цукровозалежних. Нині проблеми профілактики і лікування цукрового діабету є актуальними для їх дослідження. Поширеність цукрового діабету в світі становить від 2 до 5 %, а у вікових групах старше 60 років сягає 8–10 %. Захворюваність цукровим діабетом в Україні також неухильно зростає і набуває більш молодого віку. За останніми даними в світі близько 145 млн осіб страждають на цукровий діабет і, як прогнозують учені, кількість їх може зрости за два–три роки до 300 млн (Старкова, 2002). Невід’ємною складовою лікування цукрового діабету є дієтотерапія. Хворим на цукровий діабет необхідно дотримуватися харчування, враховуючи фізіологічні потреби організму, масу тіла, вік, фізичне навантаження, професію і місце мешкання, а також тип тяжкості, перебіг хвороби і наявність супровідних захворювань і ускладнень. Дієта повинна містити підвищену кількість вітамінів групи В, аскорбінової кислоти. Вміст білка має знаходитися в межах фізіологічних норм, але його введення індивідуалізованим. Дієта передбачає обмеження тваринних жирів, вуглеводів за рахунок зниження споживання цукру і цукровмісних продуктів. Такий контроль за споживанням продуктів необхідний через набуту інсулінову резистентність – феномен, пов’язаний з порушенням здатності інсуліну стимулювати захоплення глюкози клітинами-мішенями і знижувати рівень глюкози в крові. У відповідь посилення секреції інсуліну підшлунковою залозою і гіперінсулінемія – компенсаторні реакції організму. Її розглядають як системний збій ендокринної регуляції в організмі. Фізіологічні причини ІР різноманітні. Основними є харчове перевантаження і накопичення в клітинах певних ліпідів та їх метаболітів, низька фізична активність, хронічне запалення і

стрес різної природи, включаючи оксидативний і “стрес ЕПР” (порушення розпаду пошкоджених білків у клітині) (Кихтяк, 2006).

Сьогодні ринок товарів діабетичного призначення помітно розширився. З'явилися нові види продуктів: печиво вівсяне на фруктозі, пряники, шоколад молочний без цукру з фруктозою, цукерки “пташине молоко” на фруктозі, хлібці, сиропи, вафлі з какао на фруктозі, дієтичні на фруктозі з арахісом та висівками, каші. В основному солодощі для людей, що хворіють на цукровий діабет, представлені хлібобулочними виробами або цукерками на основі какао, виготовленими на основі фруктози чи синтетичних цукрозамінників. Продукції на фруктовій основі в асортименті представлено вкрай мало, здебільшого це сиропи на фруктозі. Саме тому об'єктом для вдосконалення обрано рецептуру пастилки із фруктового пюре.

Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) і Організація Об'єднаних Націй (ООН) визначили цукровий діабет (ЦД) як найбільш небезпечний виклик усій світовій спільноті в ХХІ столітті. Цукровий діабет за темпами поширеності випереджає всі неінфекційні захворювання. За останні 20 років чисельність хворих на ЦД в світі збільшилася майже в 3 рази (з 130 млн у 1990 році до 366 млн в 2011 р). За даними ООН і ВООЗ, від цукрового діабету кожні 7 секунд у світі помирає 1 хворий, кожні 10 секунд хворіють 12 чоловік; щорічно помирає близько 4,6 млн хворих.

Однією з причин розвитку цукрового діабету другого типу є неправильне харчування. Близько 90 % хворих на цукровий діабет другого типу мають надлишкову масу тіла або ожиріння. Дослідження показали, що при збільшенні маси тіла на 8,0–10,9 кг ризик розвитку ЦД 2 зростає у 2,7 раза. Крім того, ймовірність розвитку цукрового діабету другого типу визначається також тривалістю ожиріння і особливостями відкладення жирової тканини в організмі. У чоловіків при окружності талії 100 см і більше незалежно від індексу маси тіла, ризик розвитку СД 2 зростає в 3,5 раза (Бутрова, 2013).

За даними Новосибірського державного медичного університету, у раціоні людей, в яких діагностували цукровий діабет, порушувалися дієтичні норми харчування.

У групі хворих на цукровий діабет першого типу виявлено перевищення вживання копченостей (м'ясних, ковбасних, консервованих і т.д.) на 89,2 %, пшеничного хліба вищого сорту – на 30,2 % і макаронних виробів на 89,2 %, продуктів, що містять велику кількість цукру і легкозасвоюваних вуглеводів на 89,8 % порівняно з рекомендованими нормами (білки 16 %, жири 24 %, вуглеводи 60 %). За такого харчування на 75 % знижено вживання овочів (при нормі в 5–7 % від загальної кількості вуглеводів) і несолодких фруктів.

У групі хворих на цукровий діабет другого типу в поєднанні з інфарктом міокарда виявлено перевищення вживання копченостей (м'ясних, ковбасних, консервованих і т.д.) на 31,6 %, пшеничного хліба вищого сорту – на 29,1 % і макаронних виробів – на 68,2 %, вживання солодошів і продуктів, що містять велику кількість цукру і легкозасвоюваних вуглеводів на 77,2 %. Овочі і несолодкі фрукти знижені в раціоні харчування на 70 % порівняно з рекомендованою нормою (Антипьева, Киметова, 2012).

Сьогодні оптимальною для покращення продуктами, що може бути введена в раціон хворих на цукровий діабет другого типу, є група солодошів на фруктовій основі. На українському ринку діабетичних солодошів продукція на основі фруктів зустрічається лише у вигляді джемів та сиропів. Одним із видів солодошів на фруктовій основі, які можна впровадити в раціон хворих на діабет є пастила. Рецепт класичної пастили не підходить для хворих, тому що виробляється на основі цукрового сиропу. Одним з раціональних шляхів вирішення даної проблеми є використання натуральних цукрозамінників, до яких належать топінамбур та цикорій.

Топінамбур містить вітаміни А, В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, С, мікроелементи (Fe, Mn, Ca, Mg, K, Na, Zn), клітковину та полімерний гомолог фруктози – інулін. Він добре допомагає при різних захворюваннях: подагрі, сечокам'яній хворобі, анемії, відкладенні солей, ожирінні; знижує рівень глюкози в крові, сприяє зниженню тис-

ку, підвищує гемоглобін, а також позитивно впливає на підшлункову залозу. Він має здатність виводити з організму солі важких металів, токсини, радіонукліди і надлишок холестерину, що обумовлено спільними діями інуліну і клітковини.

Цикорій містить вітаміни С, В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>5</sub>, В<sub>9</sub>, мікроелементи К, Mg, P, Ca, Fe, Mn, Cu, Se, Zn, клітковину та полімерний гомолог фруктози – інулін. Крім того, в ньому знаходяться пектин. Цілющі властивості цикорію пояснюються високим умістом інуліну. Рослину використовують при лікуванні атеросклерозу, цукрового діабету, ожиріння, за різних інтоксикацій. Крім того він має здатність виводити іони важких металів, отрути, радіонукліди, причому в 2,5 рази інтенсивніше, ніж пектин. Біологічно активні речовини цикорію рефлекторно посилюють секрецію шлункового і кишкового соку, підвищують апетит (Яценко та ін., 2002).

Висновком із проаналізованих джерел є виявлення функціонально-технологічного потенціалу додавання порошків та сиропів із топінамбура та цикорію до пастильних мас з метою створення оздоровчого, дієтичного продукту. Це такі продукти, які не порушують збалансованість раціону, не підвищують рівень цукру в крові та містять необхідну кількість вітамінів.

Виготовлення харчових продуктів оздоровчого призначення є основною метою діяльності спеціалізованих харчових підприємств. До того ж необхідно посилити позицію на ринку вітчизняних кондитерських виробів дієтичного призначення шляхом розширення асортиментного ряду, збільшення випуску виробів підвищеної харчової та біологічної цінності.

Завдання включає також розробку і дослідження продукції дієтично-діабетичного призначення на основі фруктового пюре з подальшим поліпшенням її порошками та сиропами цикорію і топінамбура.

## **5.2. Обґрунтування доцільності розробки нового продукту та введення його на ринок**

Для визначення доцільності виробництва нового харчового продукту в промислових масштабах спеціалісти проводять маркетингове дослідження – це збирання, обробку й аналіз даних за темою зниження ризику і невизначеності. Для виробника нової продукції доцільним є вивчення існуючого ринку даної групи товарів, конкурентів, споживчих потреб, цін, внутрішній потенціал підприємства.

### **5.2.1. Розробка анкети та анкетування споживачів**

Анкетування – різновид маркетингового дослідження, який дає нам можливість дізнатися думку про товар чи послугу, роль його на ринку та власне бачення споживацького середовища. У результаті отримуємо оцінку діяльності компанії, певного продукту чи сервісу з боку покупця, його зауваження та пропозиції, які часто стають змістовним аргументом до створення іміджу та статусу торгової марки. Інтерв'ювання вибудовує зв'язок покупця з менеджментом компанії та стирає кордони між двома основними складовими ринку. На фоні росту конкуренції та боротьби брендів за клієнтів, таке маркетингове дослідження слугує ефективним методом для виходу нових торговельних гравців та закріплення позицій уже існуючих. Визнано, що анкетування належить до надійних інформаційних джерел для побудови злагодженої та грамотної рекламної компанії.

Анкетування – метод отримання інформації шляхом письмових відповідей респондентів на систему стандартизованих запитань попередньо підготовлених бланків – анкет. Анкетування входить до групи методів, яка в соціології, педагогіці та психології носить назву “опитування”. Крім анкетування, до групи ще входять інтерв'ю і бесіда.

Метод анкетування виник у XVII ст. під час розробки “політичної арифметики”. Тоді наукових принципів проведення анкетування не існувало, інфор-

мацію збирали освічені люди за допомогою спеціальних формулярів. Із підвищенням освіченості населення анкетування поширювалося в різних сферах людської діяльності, ставши ефективним методом збирання інформації.

Шляхом узагальнення заповнених анкет отримується об'єктивна інформація про ставлення населення, окремих соціальних груп, регіону споживачів до певних товарів, послуг чи до окремих явищ, подій тощо. Така інформація може використовуватися в розробці програм впливу на соціально-політичні події, розвиток ринку, формування попиту населення при здійсненні заходів щодо вдосконалення виробництва товарів та розширення послуг.

*Соціопитування споживачів.* Виявити побажання споживачів і розробити нову продукцію, орієнтовану на певне коло споживачів, дозволяють певні методи дослідження ринку й бажань споживача. Таким дослідженням є соціопитування. Переваги даного методу полягають у тому, що за невеликий проміжок часу можна опитати значну кількість респондентів. Інформація від споживачів сприяє кращому розумінню їх звичок, очікуванню, особливостям поведінки при виборі продукту і являє велику цінність при стратегічному плануванні й розробці нової продукції. Дані, одержані в ході маркетингових досліджень, дозволяють правильно обрати ринок, розробити товар і більш ефективно позиціонувати його на ринку, спланувати збут, визначити поведінку споживачів і передбачити реакцію конкурентів.

### **5.2.2. Розробка концепції нового продукту**

Створення концепції нового продукту – один з перших, найбільш відповідальних кроків при його розробці. Існує багато визначень терміна “концепція продукту”; концепція продукту являє собою сукупність головних вимог до продукту, його якості і призначення, що передбачають подальше вдосконалення виробу; виражає основні стратегічні ідеї продукту, якими може керуватися виробник у найближчій перспективі.

Беручи до уваги викладене, можна сформулювати необхідність розробки продукту, який буде задовольняти вимоги споживачів. Об'єктом досліджень



роботи слугує ідея розробки технології нового функціонального продукту. Перспективна реалізація нової технології дозволить забезпечити розширення асортименту харчових продуктів за рахунок використання нових видів сировини. Використання напряду покращення технології забезпечує основні споживчі властивості нового продукту.

Критерії якості готової продукції визначають за допомогою прогнозування можливих органолептичних характеристик, які можна описати, виходячи з теоретичних уявлень про технологічний процес виробництва продукту-аналогу. Такі критерії є умовними, тому й можуть корегуватися протягом перебігу технологічного процесу.

### **5.2.3. Формування споживчої моделі якості харчового продукту**

Можливість товару або послуги задовольняти обумовлені або передбачувані потреби покупця визначається за допомогою спеціальних показників якості. Показник якості – це кількісна характеристика однієї або декількох властивостей продукції за певних умов її створення, експлуатації або споживання. Отже, якість – це здатність сукупних характеристик продукції задовольнити вимоги споживача. Характеристикою вважається будь-яка відмінна властивість. Вона може бути власною чи заданою, якісною чи кількісною і належати до різних класів.

Вимоги споживача визначаються багатьма факторами:

- видом харчування (набором продуктів, режимом харчування, особливостями технологічної обробки і оформлення, правилами подачі);
- віком, статтю, видом діяльності, індивідуальними особливостями організму, станом здоров'я, віросповідання;
- морально-етичними ознаками, національними заборонами, звичками.

#### **5.2.4. Представлення нового харчового продукту за методом «фокус-група». Розробка робочих листів учасника фокус-групи**

Проведення фокус-групи. Фокус-група – це група споживачів певного товару. З нею працює спеціаліст-маркетолог, який шляхом проведення бесіди з членами групи намагається з'ясувати їх думку про товари – функціональні якості, їх пріоритетність, дизайн, способи та умови реалізації.

Найбільш корисними результатами мають бути такі:

- отримання фактичних цифрових даних про покупки, здійснені споживачами. Приклад: у продуктовому магазині продають десятки видів кондитерських виробів. Які з них найчастіше реалізуються? Цифри нададуть конкретну інформацію про реальні споживацькі переваги;

- важливе значення має формування узагальненого портрета споживача: вік, стать, рід діяльності, регулярність покупок, звички, освіта та ін. Ця інформація допомагає в правильній побудові комунікацій (зміст та форма звернення, вибір каналу комунікації), у проведенні моніторингу товарної політики компанії (оцінка споживачами пріоритетності властивостей товару, дизайну та інших компонентів);

- опитування споживачів може бути важливим для активізації просування товарів шляхом звернення безпосередньо до споживача (як передчасне рекламування продукту).

### **5.3. Вплив технологічних параметрів при виробництві продукту**

#### **5.3.1. Макаронні вироби на основі клітковини гречаної**

Методом багатofакторного експерименту було визначено оптимальне дозування клітковини гречаної (одержаної за ТУ У 15.8-24239651-007:2007) для макаронних виробів, що підвищує вміст вітамінів та мінеральних речовин у виробах до статусу функціонального інгредієнта.

Проведення експериментів складалося з декількох етапів: підігрівання води до 40°C; просіювання борошна пшеничного та клітковини гречаної;

з'єднання рецептурних компонентів; вимішування тіста (~10 хв); розкатування тіста товщиною 2–3 мм; нарізання виробів (~1,5 см, ширина 3–10 мм); сушіння виробів (~60°C). Досліджувані зразки готували з використанням борошна пшеничного ТМ «Дніпромлин», клітковини гречаної ТОВ «Агросільпром» і води, кількість якої вносили з урахуванням початкової вологості сировини за рецептурою (Калина, Гола, 2018).

На основі проведених досліджень встановлено оптимальне співвідношення основних рецептурних інгредієнтів (табл. 5.4) та визначено їх якість за органолептичними та фізико-хімічними показниками (табл. 5.5; 5.6) згідно з ГОСТ 14849-89.

Таблиця 5.4 Рецептура для макаронних виробів

№ з\п	Інгредієнт	Кількість, %		
		70	50	60
1	Борошно пшеничне	70	50	60
2	Клітковина гречана	20	40	30
3	Вода	10	10	10

Аналізуючи дані таблиць, можливо зробити такі висновки:

- додавання 20% клітковини гречаної майже не змінює органолептичні та варильні показники порівняно зі стандартними макаронними виробами;
- додавання клітковини гречаної у кількості 40 % надає розсипчастої консистенції тісту, виріб занадто сухий і нееластичний;
- додавання 30% клітковини гречаної забезпечує найкращі органолептичні і варильні властивості макаронних виробів.

Вірогідно, обумовленим у системі (рецептурі) “борошно пшеничне – клітковина гречана – вода” можемо вважати співвідношення 60 : 30 : 10. Нами обчислено калорійність розробленого нового продукту, що становить 320,55 ккал/100 г.

Отже зразки макаронних виробів з клітковиною гречаною відповідають стандартним нормам (ДСТУ 7043:2009), дещо відрізняються за кольором – змінюється з жовтуватого (кремового) до сіруватого (5.5; 5.6). Змінюються також смак та запах, які властиві гречці (Пат. 133542. Україна ..., 2019).

Для визначення доцільності виробництва нових макаронних виробів з клітковиною гречаною в промислових масштабах проведено маркетингове дослідження. Для виробника нової продукції необхідним було глибоке вивчення існуючого ринку даної групи товарів і споживчих потреб. З цією метою проводили інтерв'ювання споживачів. Їх відповіді допомогли визначити перспективність створення даного товару з певними споживчими властивостями.

Таблиця 5.5 Органолептичні показники макаронних виробів з додаванням клітковини гречаної

Показник	Характеристика
Колір	Сіруватий відтінок, може містити сліди клітковини
Поверхня	Гладка, дозволяється незначна шорсткість
Форма	Відповідає типу виробу
Смак та запах	Присутній запах та присмак гречки, даному типу виробу властиві
Стан виробів після варіння	Зварені до готовності вироби зберігають форму

Таблиця 5.6 Фізико-хімічні показники макаронних виробів з додаванням гречаної клітковини

Показник	Значення
Вологість, %	12,4
Кислотність, %	3,8
Варильні властивості, хв	12–14

Під час дослідження існуючого ринку макаронних виробів виявлено близько 65 % імпорتنих виробів, в основному вироби з Італії та Польщі. Вони привертають увагу споживачів, оскільки представлені за різноманітною формою та кольором (рис. 5.1).

Аналіз одержаних результатів після опитування споживачів різної вікової категорії свідчить про те, що головними критеріями вибору макаронних виробів того чи іншого виробника є: “не злипаються та не розварюються” – 71,3 %, “зберігають форму після варіння” – 57,5 %, “торгівельна марка” – 22,8 %.

Результати маркетингових досліджень ринку макаронних виробів України показали, що вітчизняні макаронні вироби виготовляють переважно з борошна м'яких сортів пшениці, що за своїми якісними показниками та оригінальні-

стю зовнішнього оформлення поступаються продукції зарубіжного виробництва, але за ціновими характеристиками є більш доступними, ніж іноземні аналоги.

Експериментальні зразки макаронних виробів з клітковиною гречаною показали, що внесення 30 % клітковини гречаної забезпечує найкращі органолептичні і варильні властивості. Додавання клітковини гречаної в макаронні вироби дасть змогу підвищити харчову цінність виробів, забезпечити добову норму вживання клітковини, тобто 30 г на добу. Щоденне вживання клітковини зменшує ймовірність виникнення інсульту, рослинне волокно зменшує відчуття голоду, виводить токсини, радіонукліди та важкі метали, сприятливо впливає на мікрофлору кишечника. Завдяки цьому макаронні вироби можуть стати дієтичним продуктом, який буде забезпечувати всіма необхідними поживними речовинами.



Рис. 5.1. Основні критерії вибору макаронних виробів

Маркетингові дослідження підтвердили, що на українському ринку потрібно розширювати асортимент макаронних виробів, зокрема саме функціонального призначення. Виробництво макаронних виробів з клітковиною гречаною можуть бути конкурентоспроможними на українському ринку та за межами країни.

Низька калорійність продукту свідчить про його низький рівень жирів і підвищений вміст клітковини, що сприятиме макаронним виробам нести оздоровчий характер та стати незамінним продуктом для корисного збалансованого харчування (Калина, Гола, 2018).

### 5.3.2. Фруктово-овочеві гранули в системі натрію альгінат–кальцію фосфат

Експериментальні дослідження проводили в науково-дослідній лабораторії інженерно-технологічного факультету Дніпровського державного аграрно-економічного університету.

Технологія виробництва гранул полягає в екструзії суспензії кальцію фосфат в розчині альгінату натрію, фруктово-овочевому соку та цукру до приймаючого середовища, яке містить лимонну кислоту, кальцію лактат, воду та цукор. На основі проведених досліджень встановлено оптимальне співвідношення основних рецептурних інгредієнтів – табл. 5.7 (Калина, Тарабара, 2018; Калина, Тарабара, 2019).

Таблиця 5.7 Співвідношення компонентів у системі “натрію альгінат–кальцію фосфат–кальцію лактат–лимонна кислота”, %

Розчин для екструзії				Приймаючий розчин			
AlgNa, %	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , %	Цукор, %	Сік, %	Лактат кальцію, %	Лимона кислота, %	Цукор, %	Вода, %
1,0	0,6	20	78,6	0,4	0,44	20	78,95

У дослідях використовували складний механізм внутрішнього структурування, який проходить у декілька етапів. Перший етап – це утворення поверхневого шару гранули за рахунок взаємодії натрію альгінату з вільними катіонами кальцію, джерелом яких є кальцій лактат. На цьому етапі гель утворюється тільки в поверхневих шарах, а в середині капсули знаходиться суспензія каль-

цію фосфату в розчині натрію альгінату, що досі не прореагував. На цьому етапі відбувається формоутворення продукту (у даному випадку гранули).

Другий етап гелеутворення проходить досить повільно, оскільки базується на властивостях дифузії. Поверхневий шар капсули, що був одержаний на першому етапі, не є суцільним; гель має отвори невеликих розмірів для того, щоб молекули лимонної кислоти могли дифундувати у внутрішнє середовище системи.

Дифундуючи, лимонна кислота реагує зі суспензією кальцію фосфату, що знаходиться в розчині альгінату натрію. Кальцій фосфат стає джерелом необхідних іонів кальцію для утворення гелю альгінату натрію. Починається процес гелеутворення, який іде не від поверхні гранули, як за зовнішнього структурування, а навпаки. Цей процес можна візуально спостерігати за зміною кольору. У кінці другого етапу система являє собою не капсули, а гранули.

Нами розроблено три види гранул: на основі морквяного, бурякового і грушевого соків (рис. 5.2; 5.3; 5.4) та визначено їх якість за органолептичними показниками (табл. 5.8).

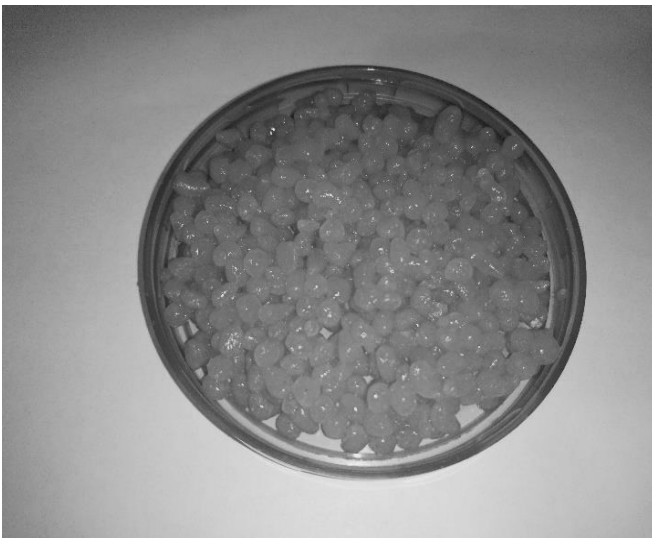


Рис. 5.2 – Альгінатні гранули на основі морквяного соку



Рис. 5.3 – Альгінатні гранули на основі бурякового соку

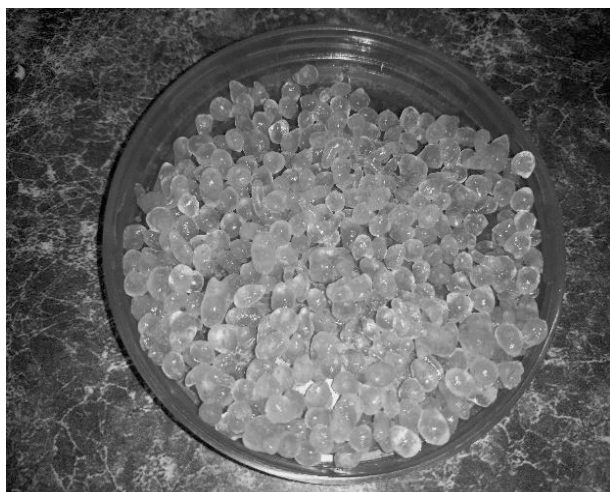


Рис. 5.4 – Альгінатні гранули на основі грушевого соку

Таблиця 5.8 Органолептичні показники альгінатних гранул на основі фруктових соків

Показник	Характеристика продукту
Зовнішній вигляд	Поверхня рівна, без деформацій, гранули однакової форми
Колір	Колір гранул залежить від кольору соку, на основі якого виготовлені: грушеві – майже прозорі; морквяні – помаранчеві; бурякові – темно-червоні
Консистенція	Гранули легко відділяються одна від одної. Мають еластичну, пружну та однорідну консистенцію.
Смак і запах	Смак приємний, солодкий, з вираженим ароматом соку, без сторонніх присмаку та запаху

Отже можна зробити висновок: досліджувані зразки відповідають вимогам до харчових продуктів.

На другий день зберігання на поверхні гранул з'являються крапельки рідини, утворюючи суцільну рідку фазу. Відбувається розділення студню на дві фази – дисперсійну і дисперсну. Подібний мимовільно виникаючий процес одержав назви синерезису. Рідка фаза, що виділяється при синерезисі, є нечистим розчинником, а дуже розбавленим розчином.

При синерезисі, внаслідок збільшення числа контактів частинок дисперсної фази, спостерігається зміцнення гелю (гранул) з одночасним підвищенням його еластичності і пружності. При цьому відбувається стягання структурної сітки гелю, в результаті чого гель вичавлює із себе значну частину іммобілізова-



ної рідини і зменшується в об'ємі. Швидкість синерезису колоїдів різна. Вона зростає з підвищенням температури і збільшенням концентрації.

Оскільки процес синерезису є незворотним, то розроблені фруктово-овочеві гранули на основі альгінату натрію не можуть зберігатися тривалий час. Рекомендовано використовувати їх одразу після приготування як самостійний продукт або для прикрашення страв.

### 5.3.3. Кремово-збивні цукерки, збагачені бджолиним обніжжям

У Дніпровському аграрно-економічному університеті експериментально-розроблено (Пат. 135162. Україна ..., 2019) рецептуру збивних цукерок “Пташине молоко” – табл. 5.9.

Таблиця 5.9 Рецептура для збивних цукерок “Пташине молоко”

№ з/п	Рецептурні інгредієнти, %								Характеристика продукту
	збивна маса						глазур		
	цукор	згущене молоко	вершки 10%-ві	агар	яєчний білок	лимонна кислота	бджолине обніжжя	какао в шоколадній глазури	
1	18	9	25	0,4	20	0,18	5	65	Зменшення збивної маси в об'ємі.
2	29	10	20	0,6	15	0,18	7	65	Збивна маса з високою піноутворюючою здатністю стійкої консистенції. Глазур має квітковий після смак.
3	29	12	19	0,8	9,6	0,20	9	65	
4	30	14	20	0,6	25	0,18	11	65	Зменшення збивної маси в об'ємі, рідка консистенція.
5	18	15	25	0,4	25	0,20	11	72	

На основі проведених досліджень встановлено оптимальне співвідношення основних рецептурних інгредієнтів. Експериментальні зразки збивних цукерок “Пташине молоко” за рецептурами № 2, № 3 потрапляють в діапазон, який дозволяє отримати задовільні структурно-механічні показники збивної маси і шоколадної глазури, а також органолептичні та показники біологічної цінності

готового виробу (табл. 5.9). Рецептури № 1, № 4, № 5 не відповідають контрольному зразку.

Для визначення доцільності виробництва збивних цукерок з використанням бджолиного обніжжя в промислових масштабах нами проведено маркетингове дослідження. Для виробника нової продукції доцільним є дослідження існуючого ринку даної групи товарів і вивчення споживчих потреб. З цією метою проводили інтерв'ювання споживачів. В опитуванні брали участь 52 респонденти. Серед них було 14 чоловіків та 38 жінок різної вікової категорії (рис. 5.5). Для визначення загальної думки споживача про харчування одержано їх відповіді на запитання “Цікавиться ви темою здорового харчування?” (рис. 5.6).

В опитуванні здебільшого брали участь люди, вік яких є більш серйозним та стабільним, віком від 35 до 44 років. З метою створення перспективного продукту оздоровчого призначення встановлено, що 87 % респондентів цікавляться темою здорового харчування.

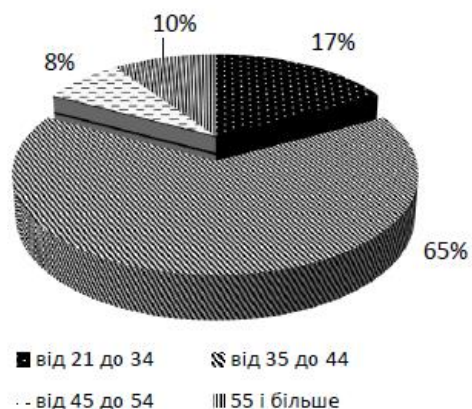


Рис. 5.5 – Розподіл відповідей респондентів за віком

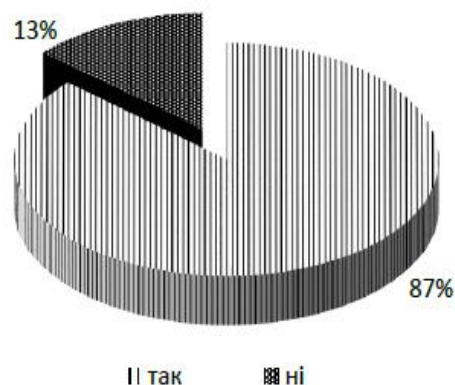


Рис. 5.6 – Відношення респондентів до здорового харчування

Під час дослідження існуючого ринку збивних цукерок виявлено, що близько 9 % – це імпорتنі вироби, в основному вироби з Білорусії та Польщі.

Анкетування респондентів допомогло з визначенням перспективності створення даного продукту з певними споживчими властивостями. Причини вибору збивних виробів споживачами представлено на рисунку 5.7.

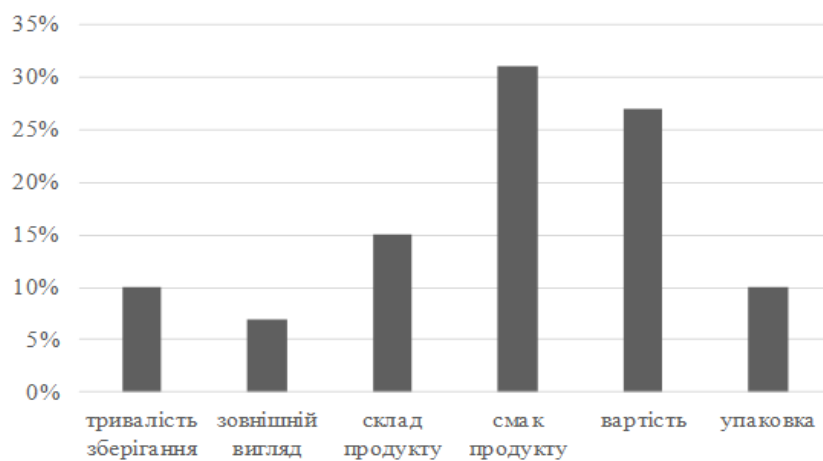


Рис. 5.7. Основні критерії вибору збивних виробів

Після опитування споживачів різних вікових категорій стало відомо, що головними критеріями їх вибору стали: “смакові властивості” – 30,77 %, “вартість” – 26,92 %, “склад продукту” – 15,38 %. Більшість споживачів обирають переважно шоколадні цукерки або цукерки, вкриті шоколадною глазур’ю. Серед споживачів, які купують цукерки, більшість – жінки. Важливим фактором при виборі цукерок є їхня калорійність цукерок та наявність корисних компонентів. Асортимент практично всіх кондитерських підприємств, що випускають цукерки включає збивні цукерки типу “Пташине молоко”.

Удосконалий нами продукт належить до сегмента оздоровчого призначення, він допоможе задовільнити потреби дитячого організму в мінеральних елементах, а також стати корисним для людей із захворюваннями системи кровообігу, які ведуть здоровий спосіб життя і стежать за своїм раціоном. Технічний результат полягає у створенні збивних цукерок функціонального призначення з додаванням бджолиного обніжжя. Сукупність усіх ознак заявленої рецептури дозволяє розробити цукерки особливого складу, збалансованого за поживними речовинами; розширити асортимент кондитерських виробів та дає можливість споживання корисного продукту дітям та хворим з низьким рівнем гемоглобіну. Залежно від ботанічного походження бджолине обніжжя має різний склад, що дозволяє одержати вироби з необхідним умістом корисних речовин.

### 5.3.4. Шоколадні тістечка на основі бобової культури – нут

У Дніпровському аграрно-економічному університеті експериментально визначено раціональні співвідношення рецептурних інгредієнтів для створення десерту «БрауНут» із задовільними показниками якості – табл. 5.10 (Пат. 134510. Україна ..., 2019).

Як бачимо зразки десерту “БрауНут” за рецептурами № 2–4 попадають в діапазон, що дозволяє одержати задовільні структурно-механічні показники тіста та органолептичні показники готового виробу; рецептури № 1 та № 5 не відповідають контрольному зразку.

Таблиця 5.10 Рецептура для десерту “БрауНут”

№ рецептури	Рецептурні компоненти, %								Висновки
	нут	яйце	молоко 3,2%	банан	фруктоза	какао-порошок	розпушувач	всього	
1	30	22	19	15	11	2	1	100	Незадовільні структурно-механічні властивості тіста
2	34	20	18	14	10	3	1	100	Покращені структурно-механічні показники тіста та органолептичні показники готового виробу
3	35,5	19,5	17,5	13,5	9	4	1	100	
4	37	19	17	13	8.5	4.5	1	100	
5	47	16	13	10	7	6	1	100	Значно погіршені органолептичні показники готового виробу

Використання методу бальної оцінки дає можливість визначити органолептичні показники якості експериментальних зразків (рис. 5.8).

Досліджувані вироби, виготовлені на основі нуту – 35,5 % (рецепт № 3) мали найвищу оцінку за всіма показниками. Зазначимо, що якість десерту суттєво знижується зі зменшенням (рецепт № 1) і зі значним збільшенням (рецепт № 5) частки нуту майже за всіма критеріями оцінки виробу.

Зразки десерту “БрауНут” проаналізовано за фізико-хімічними показниками якості та порівняно з контрольним зразком рисунку 5.9; 5.10.

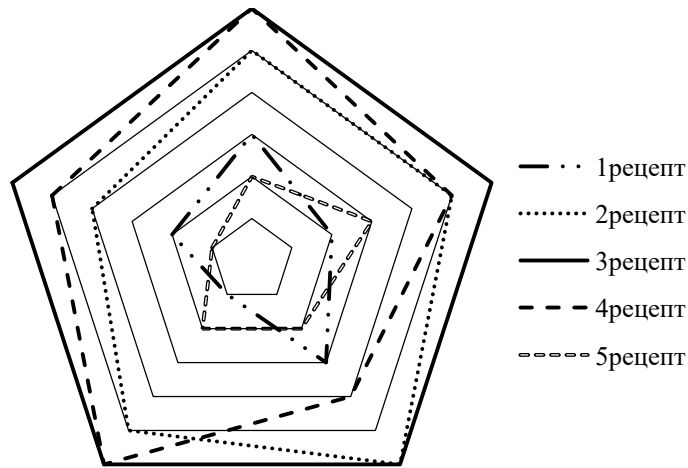


Рис. 5.8. Профілограми органолептичної оцінки десерту «БрауНут»

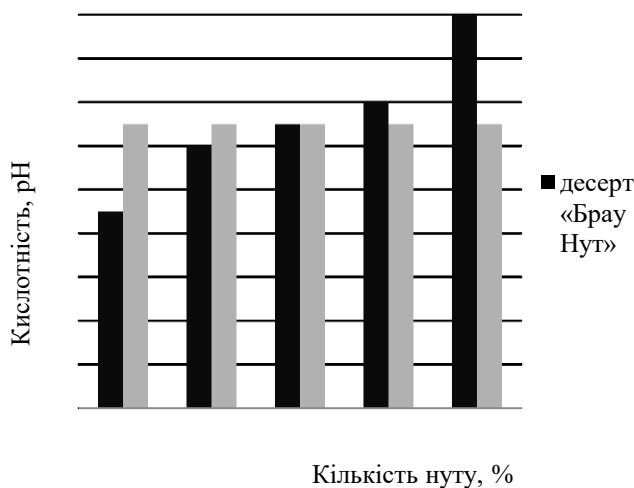


Рис. 5.9. Залежність кислотності від кількості сировини – нут

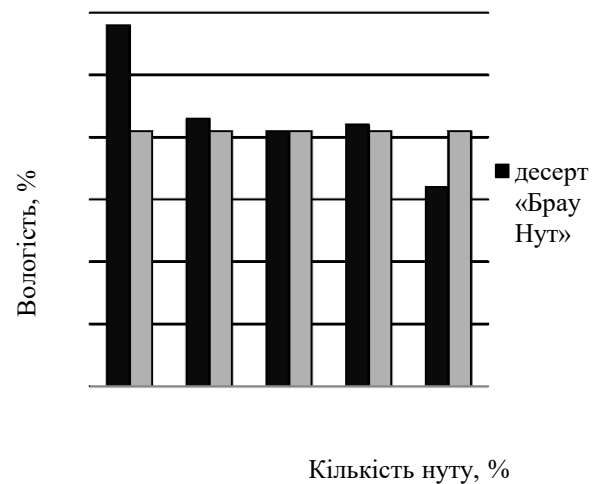


Рис. 5.10. Залежність вологості від кількості сировини – нут

Показники якості десертів однакові при вмісті нуту 35,5 %. Отже, керуючись визначеними органолептичними та фізико-хімічними показниками якості досліджуваних зразків, нами встановлено раціональні співвідношення рецептурних інгредієнтів для створення десерту «БрауНут» – за рецептурою № 3.

Для визначення загальної думки споживачів про харчування нами одержано їх відповіді на запитання: чи цікава для них тема здорового харчування? Соціопитування та анкетування споживачів здійснювали в місті Новомосковськ

Дніпропетровської області, в супермаркетах “Варус” та “АТБ”. Більшість респондентів були зацікавлені в оздоровчих продуктах – 92 %.

За допомогою маркетингового дослідження, що включає аналіз ринку, встановлено фактичні основні сегменти кондитерських виробів (рис. 5.11) та асортиментний склад функціонально-оздоровчих кондитерських виробів (рис. 5.12) з метою визначення орієнтиру для створення перспективного продукту.

Представлені дані свідчать про те, що 63 % споживачів віддають перевагу основному сегменту – шоколадним виробам; за асортиментним складом оздоровчого призначення – борошняним виробам (з умістом різного виду борошна функціонального призначення) – 30 %, шоколадним (шоколадно-горіхові пастки), навпаки – 6 %, вірогідно це пояснюється недостатньою купівельною спроможністю.

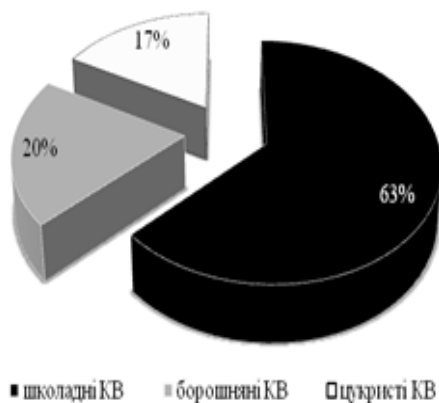


Рис. 5.11. Сегментація ринку кондитерських виробів

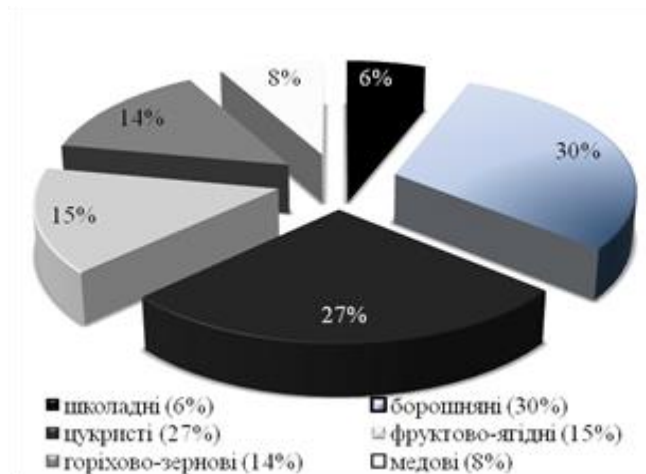


Рис. 5.12. Сегментація ринку кондитерських виробів оздоровчого призначення

Тому актуальним є створення функціональних продуктів на базі шоколадних кондитерських виробів з подальшим удосконаленням технології виробництва для одержання високоякісної конкурентоспроможної продукції.

Використання запропонованої нової рецептури дозволить одержати новий харчовий продукт на основі нуту та фруктози з подальшими перевагами:

- забезпечення організму людини денною нормою споживання білка на 67,42 %;

- зниження глікемічного індексу до 31, чим задовольнить потреби людей з цукровим діабетом, надмірною масою та людей, які ведуть здоровий спосіб життя і стежать за своїм раціоном;

- вміст 7 з 8 незамінних амінокислот, які, на відміну від замінних, не можуть синтезуватися в організмі і повинні обов’язково надходити з їжею;

- зміна рецептури десерту з повною заміною пшеничного борошна на нут не змінює органолептичні та фізико-хімічні показники якості порівняно з контрольним зразком.

Такі тістечка можуть бути включені до раціонів масового, профілактичного та дитячого харчування (Калина, Дмитрієва, 2019).

### 5.3.5. Кондитерські вироби з біологічно активними речовинами

Експериментально в дослідженнях, проведених Дніпровським аграрно-економічним університетом, визначено раціональні співвідношення рецептурних інгредієнтів та їх якість за органолептичними і фізико-хімічними показниками (табл. 5.12; 5.13) згідно з ГОСТ 15052-2014. Експериментальні зразки готових виробів представлені на рисунках 5.11; 5.12; 5.13 (Пат. 143450. Україна ..., 2020).

Таблиця 5.11. Рецептури для кексів

№ з/п	Інгредієнти	Кількість, %		
		зразок 1	зразок 2	зразок 3
1	Борошно нуту	30	33	40
2	Яйце	22	19	18
3	Журавлина	15	14	10
4	Цукор	17	13	11
5	Масло вершкове	15	20	20
6	Розпушувач	1	1	1
	Всього	100	100	100

З даних табл. 5.11 можна зробити певні висновки:

- зразок № 1 має незадовільний результат, порушено структурно-механічні властивості тіста; виріб надто м'який, не тримає форми (рис. 5.11);

- зразок № 2 – консистенція виробу задовільна, але зовнішній вигляд не відповідає показникам ГОСТ 15052-2014 (рис. 5.12);

- зразок № 3 забезпечує найкращі структурно-механічні та органолептичні властивості (рис. 5.13).



Рис. 5.11 (вміст нутового борошна 30 %); Рис. 5.12 (вміст нутового борошна 33 %)



Рис. 5.13 (вміст нутового борошна 40 %)

Використання методу бальної оцінки дозволило визначити органолептичні показники якості експериментальних зразків, дані яких представлено на рис. 5.14.

Досліджувані вироби, виготовлені на основі 40 %-вого нутового борошна (рецепт № 3) мали найвищу оцінку за всіма показниками.

Зразки кексів відрізняються від стандартних норм, але не перевищують допустимих показників (ГОСТ 15052-2014).



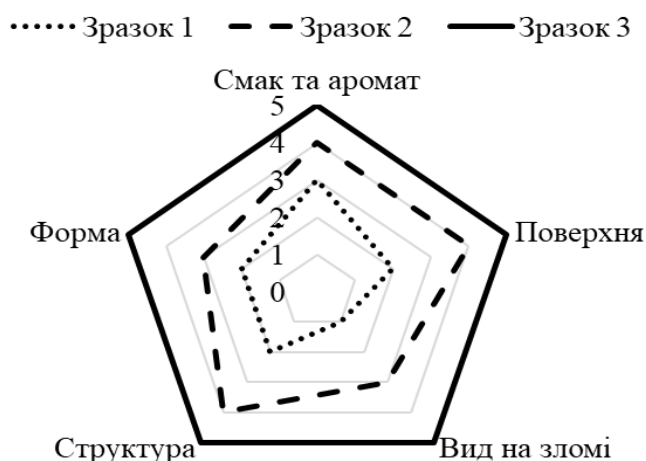


Рис. 5.14. Профілограми органолептичної оцінки безглютенових кексів

Таблиця 5.12. Фізико-хімічні показники кексів

Показник якості, %	Значення	
	експериментального продукту	за ГОСТ 15052-2014
Вологість	23,0	12,0-24,0
Кислотність	2,5	2,5

За статистичними даними в Україні спостерігається тенденція до збільшення обсягів виробництва кондитерських борошняних виробів. У дослідженнях ставили за мету проаналізувати кількісний вміст продукції, представленої на ринку. У ході аналізу виявили обсяги, структуру, широту і якість попиту, пропозиції за певний час та тенденції розвитку ринку, визначили ступінь збалансованості попиту і пропозиції, встановлювали відхилення між цими категоріями. Особливе значення надавали аналізу цін як основному факторові, що формує попит населення. Отже, нами проведено маркетингове дослідження кексів, що представлені в супермаркетах міста Дніпро (табл. 5.13).

Відповідно до даних таблиці кекси марки ТМ “Домашнє свято” і кондитерська фабрика “Жако” мають найбільший асортимент продукції (5 різних видів). Цінова політика різна, в супермаркеті “Ашан” ціна на дану продукцію вища. З усіх наведених видів продукції найвищу конкуренцію на ринку, безглютеновим кексам з журавлиною, може скласти ТМ “Домашнє свято”, в рецептурі цього продукту використовують натуральну начинку з ягід, але борошно, що входить до складу є пшеничним і містить глютен, Усі інші марки кексів не

використовують ягідні начинки, тобто ці продукти не збагачені вітамінами та мікроелементами.

Таблиця 5.13. Характеристика асортименту кексів, що реалізуються через торгову мережу України

№ з/п	Найменування кексів	Торгова марка	Маса, г	Ціна, грн (по супермаркетах)			
				“Ашан”	100 г	“Сільпо”	100 г
1.	“Святкова зірка”	ТМ “Львівський хліб”	450	51,21	11,38	50,22	10,38
2.	“Домашнє свято” полуниця	ТМ “Домашнє свято”	210	23,98	11,42	22,05	10,50
3.	“Домашнє свято” малина		35	5,47	14,42	4,72	13,50
4.	“Домашнє свято” магаленас здобний, з начинкою лісова ягода		35	5,47	14,42	4,72	13,50
5.	“Домашнє свято” з полуничною начинкою		35	5,47	14,42	4,72	13,50
6.	Кекс “Жако” класичний		Кондитерська фабрика “Жако”	240	22,60	9,42	24,0
7.	Кекс “Жако” шоколадний	240		28,48	11,87	26,08	10,87
8.	Кекс “Жако” вершковий	240		21,96	9,15	24,36	10,15
9.	Кекс “Жако” згущене молоко	240		22,60	9,42	24,0	10,0
10.	Кекс “Жако” шоколадний	1000		78,09	7,89	-	-
11.	Кекс “Powernut” молочний, шоколад з арахісом і карамеллю	Saray	30	6,22	20,76	-	-
12.	Кекс з какао і маршмеллоу, в молочному шоколаді	Luppo	30	7,14	23,83	6,72	22,43
13.	Кекс з банановою начинкою, у какао-молочній глазурі	Brawo Donut	50	6,03	12,06	-	-
14.	“Мафін” шоколадний	Ашан	1000	90,05	9,05	70,05	7,05
15.	“Мафін” класичний		1000	80,0	8,00	60,05	6,05
16.	“Мафін” шоколадний	Сільпо	1000	90,05	9,05	70,05	7,05
17.	“Мафін” класичний		1000	80,0	8,00	60,05	7,05

Розрахована собівартість безглютенових кексів з журавлиною, яка становить 90 грн/400 г. Розроблений новий виріб може конкурувати з існуючими на ринку кондитерськими виробами.

Для визначення попиту на дану продукцію у споживачів проведено соціопитування серед людей різної вікової категорії.

На рисунку 5.14, а наведено результати відповідей на поставлене запитання: “Звертаєте Ви увагу на нові товари, які з’являються на ринку?”. 25 осіб (50 %) респондентів з 50 опитаних звертають увагу на нову продукцію. Не звертають увагу – 8 осіб (16 %), якщо приваблює реклама – 17 осіб (34 %).

На рисунку 5.14, б представлено результати відповідей на поставлене запитання: “Як часто Ви купуєте випічку в магазині?”. Більшість людей купують хлібобулочні вироби кожного дня (25 із 53 осіб, тобто 47,1 %); купують кожного тижня – 20 осіб (37,7 %), кожного місяця – 5 осіб (9,4 %); і узагалі не купують – 3 особи (5,6 %).



а – зацікавленість споживачів до нових продуктів



б – споживання хлібобулочних виробів серед населення

Рис. 5.14. Соціопитування споживачів

Представлені дані свідчать про те, що 50 % споживачів звертають увагу на нові продукти, а 47 % купують випічку кожного дня.

Використання запропонованої рецептури дозволить одержати новий продукт “безглютенові кекси з журавлиною” на основі нутового борошна, забезпечити цим продуктом людей, хворих на целиакію та нетолерантність до глютену.

Склад поживних речовин нутового борошна є більш поживним порівняно з пшеничним. У достатній кількості в ньому містяться необхідні для повноцінного розвитку організму людини кальцій, фосфор, магній та інших елементів, що сприяють нормальному функціонуванню серцево-судинної системи, нервової системи, профілактиці при дерматиті, аутизмі, синдромі дефіциту уваги (Калина, Гезь, 2021).

Вживання ягід журавлини, багатой на вміст антиоксидантів, допомагає на тривалий час зберегти пам'ять і гострий зір, протидіяти інфекційним захворюванням.

Такі кекси можуть бути включені в раціони профілактичного та масового харчування.

### **5.3.6. Кондитерські вироби дієтично-діабетичного призначення**

Основною функціональною складовою пастили на основі фруктового пюре є порошки із цикорію та топінамбуру. Для визначення кількісного вмісту макронутрієнтів, мінеральних елементів та вітамінів у порошках топінамбура й цикорію нами проведено його порівняльну характеристику (табл. 5.14).

Отримані дані (Калина, Єфимов, 2019) підтвердили, що порошок топінамбура містить значно менше вуглеводів та інуліну порівняно з порошком цикорію. Тому доцільно обрати саме порошок топінамбура як харчову добавку, оскільки він має найменший, ніж порошок цикорію, глікемічний індекс.

Глікемічний індекс – це важливий показник, який враховують під час складання дієт для хворих на цукровий діабет та людей з надлишковою вагою. Повільне засвоєння їжі, поступові підйом і зниження рівня цукру в крові за низького глікемічного індексу допомагають людям з діабетом контролювати концентрацію глюкози в крові. Перевагами низького показника є постійне поширення глюкози в організмі тривалістю дня; зниження апетиту; низька швидкість концентрації глюкози, що не перешкоджає утворенню запасів жиру (табл. 5.15).

Таблиця 5.14. Вміст макронутрієнтів, мінеральних елементів та вітамінів у порошках топінамбура та цикорію

Компоненти	Цикорій	Топінамбур
Макронутрієнти, г		
Білки	4,2	2,1
Вуглеводи	64,6	17,3
Харчові волокна	1,5	4,5
Зола	0,89	1,4
Моно- і дисахариди	8,7	3,2
Інулін	22,6	3,0
Вітаміни, мг		
A	6,0	1,0
B <sub>1</sub>	0,04	0,07
B <sub>2</sub>	0,03	0,06
B <sub>5</sub>	0,323	0,2
B <sub>6</sub>	0,241	0,2
B <sub>9</sub>	23,0	10,0
C	5,0	6,0
PP	0,4	2,9
Мінеральні елементи, мг		
K	290,0	200,0
Ca	41,0	20,0
Mg	22,0	12,0
P	61,0	78,0
Fe	0,8	0,4
Na	50,0	35,0
Zn	0,33	0,34
Cu	77,0	62,0
Mn	0,233	0,146
Se	0,7	0,8

Зразки продуктів № 3 та № 5 попадають у діапазон, що дозволяє одержати задовільні структурно-механічні та органолептичні показники готового виробу. Зразок № 6 відповідає заданим нормам, але час процесу сушіння займає в 1,5 раза більше. Зразки № 2 та № 4 потребують обережності при зберіганні через свою меншу еластичність, зразок № 1 не відповідає заданим нормам.

Використання методу балової оцінки дозволило визначити органолептичні показники якості експериментальних зразків (рис. 5.15).

Таблиця 5.15. Рецептурні компоненти дослідних зразків пастили

№ рецептури	Рецептурні компоненти, %							Висновки
	порошок топінамбура бура “Топинамбур с Селегера”	сироп топінамбура “Топинамбур селегера”	яблуко	груша	банан	слива		
1.	2	-	49	49	-	-	Пухка структура, тривалість сушіння (14 год)	
2.	-	2	49	-	-	49	Структура середньої еластичності, глянцева поверхня, задовільний час сушіння (10 годин )	
3.	4	-	48	-	48	-	Еластична структура глянцева поверхня, задовільний час сушки (11 год)	
4.	-	4	-	48	-	48	Структура середньої еластичності, глянцева поверхня, задовільний час сушіння (10 год)	
5.	4	-	23	-	73	-	Еластична структура глянцева поверхня, задовільний час сушіння (10 год)	
6.	4	-	-	-	23	73	Еластична структура, глянцева поверхня, незадовільний час сушіння (15 год)	

Досліджуваний виріб за рецептурою № 1 за усіма показниками якості нижчий, ніж бажаний рівень якості. На це впливають декілька факторів: суміш яблук та груш занадто швидко окиснюється повітрям, що впливає на колір готового виробу; яблуко і груша не є надійним структуроутворювачем, тому пастила із цієї суміші погано висушується та стає крихкою. Рецепти № 6, № 5, № 3, підібрані на основі слив та бананів, показали бажані результати і виявилися відмінними структуроутворювачами. Колір таких виробів має приємний карамельний для бананів і червоно-коричневий для слив. Поверхня виробів глянцева, приємна на дотик. Вироби дуже еластичні і не деформуються при скручуванні.

Термін зберігання продукту триває півроку при використанні харчової плівки та холодильної камери.

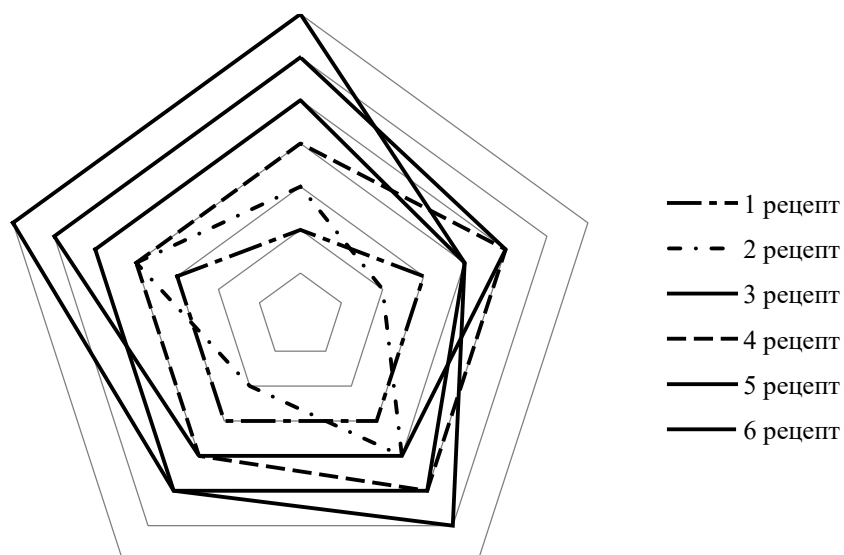


Рис. 5.15. Профілограми органолептичної оцінки пастили на основі фруктового пюре

На рис. 5.16 зображено графік зміни рівня цукру в крові хворого на цукровий діабет другого типу (ЦД 2) при введенні в його раціон пастили покращеної порошком топінамбура. Для здійснення досліджень хворі люди вживали в раціоні дослідний зразок пастили після кожного прийому їжі (сніданку, обіду, вечері) по 20 г кожного дня тривалістю 25 днів. Рівень цукру в крові людини визначали кожні 5 днів за допомогою глюкометра NEWMED Neo MSL0217W/S0217.

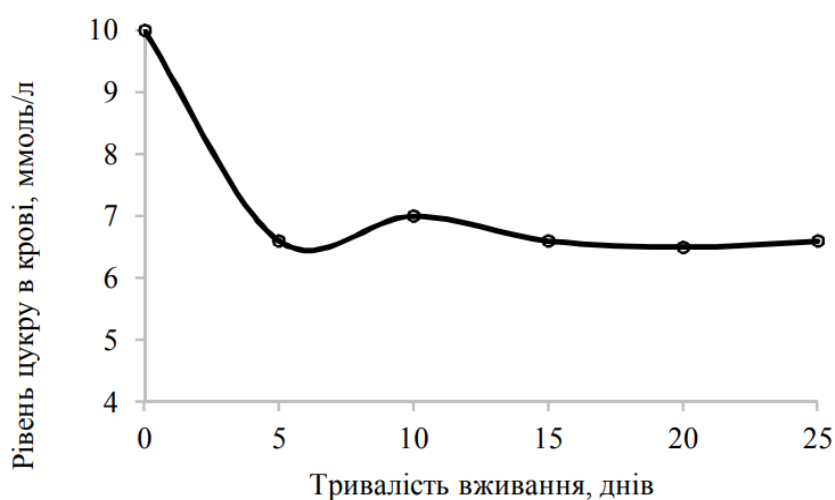


Рис. 5.16. Рівень цукру в крові хворого на цукровий діабет другого типу

На основі проведених досліджень встановлено, що удосконалений продукт при постійному вживанні не піднімає рівень цукру в крові людини (Калина, Гезь, 2021).

Використання запропонованої рецептури дозволить одержати новий харчовий продукт на фруктовій основі з перевагами – забезпечення хворих на цукровий діабет другого типу безпечним, багатим на вітаміни продуктом, що не підвищує рівень цукру в крові в короткостроковій перспективі та знижує його у довгостроковій. Крім того, такий продукт зберігає свої властивості тривалістю півроку, тому його можна використовувати взимку при дефіциті вітамінів.

#### **5.4. Висновки**

1. Проаналізовано напрямки розвитку питань використання нетрадиційної сировини та застосування сучасних технологій виробництва функціональних харчових продуктів.

2. Обґрунтовано доцільність розробки продукту та введення його на ринок. Визначено закономірності та особливості організації розроблення нових харчових продуктів.

3. Еспериментально визначено вплив технологічних параметрів при виробництві продукту на характеристику органолептичних, фізико-хімічних показників продуктів функціонального призначення.

4. Розроблено рецептури харчових продуктів: макаронні вироби на основі клітковини гречаної; фруктові-овочеві гранули в системі натрію альгінат– кальцію фосфат; кремово-збивні цукерки, збагачені бджолиним обніжжям; шоколадні тістечка на основі бобової культури – нут; кондитерські вироби з біологічно активними речовинами; кондитерські вироби дієтично-діабетичного призначення.

5. Виявлено та реалізовано доцільність використання нетрадиційної сировини при виробництві функціональних харчових продуктів. Вироблені вироби відповідають вимогам ДСТУ.



## **Розділ 6. НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СЕПАРУВАННЯ ПРОДУКТІВ ЛУЩЕННЯ ЗЕРНА ВІВСА ВІБРОУДАРНИМ МЕТОДОМ**

Найважливішою стратегічною проблемою, яка стоїть перед харчовими та переробними виробництвами, є своєчасне забезпечення фізіологічних потреб населення високоякісними, безпечними продуктами харчування. Успішна реалізація цього завдання можлива лише за умов цілковитої реконструкції цих виробництв, що заснована на досягненнях сучасної науки та техніки, створення принципово нових безвідходних та маловідходних ресурсозберезувальних технологій, які забезпечують зниження втрат сировини під час зберігання та переробки.

Вівсяна крупа – давній і поширений серед населення продукт харчування. Особлива цінність вівсяної крупи полягає в її високій поживності, легкій засвоюваності й добрих смакових якостях.

У зв'язку з розробкою і реалізацією Продовольчої програми України Кабінет Міністрів України неодноразово підкреслював незадовільний стан вирощування вівса. Відповідно були прийняті й заходи щодо підвищення виробництва та закупівлі вівса. Стосовно цієї культури підвищена закупівельна ціна й введена надбавка в розмірі 50 % закупівельних цін за продаж її державі (Авдеев А.В., 2002).

Ухвалені Кабінетом Міністрів України заходи дозволяють очікувати найближчим часом істотного збільшення виробництва вівса. Тому перед елеваторною й борошномельно-круп'яною промисловістю стоять завдання розробки нового, модернізації існуючого технологічного обладнання та впровадження новітніх ресурсозберезувальних технологій виробництва вівсяної крупи.

В Україні зі зерна вівса виробляють неподрібнену, плющену (вищого, першого та другого ґатунків) крупу, пластівці та толокно. Продукція виготов-

ляється з пропареного і непропараеного зерна і має відповідати вимогам державного стандарту (ДСТУ 7698:2015. Крупи вівсяні).

Сучасний технологічний процес виробництва вівсяної крупи не відрізняється високим ступенем досконалості, оскільки не забезпечується високий ступінь чистоти готової крупи. Неподрібнена крупа, доброякісне ядро в технології виробництва вівсяної крупи, є найціннішим продуктом. При цьому доброякісне ядро, яке можна було б охарактеризувати як крупу вищого гатунку, не завжди відповідає вимогам стандарту.

Нині найбільш досконалою вважають технологію виробництва вівсяної крупи, розроблену Всесоюзним науково-дослідним інститутом зерна і продуктів його переробки і засновану на використанні круповідокремлюючих машин різних типів на всіх операціях контролю крупи. Дана технологія дозволяє підвищити продуктивність технологічного обладнання і вихід крупи, але якість її залишається на попередньому рівні.

Отже, впровадження технологій, спрямованих на підвищення якості вівсяної крупи, без зниження продуктивності будь-якої ланки технологічного процесу, належить сьогодні до актуальних завдань, які потребують сучасної та обґрунтованої реалізації. Такі заходи дозволять збільшити обсяги виробництва крупи, розширити її асортимент, поліпшити якість й підвищити живильну цінність круп'яних виробів.

### **6.1. Загальні поняття та аналіз технічних засобів для віброударної сепарації зерна**

Недосконалість технологічних процесів серійних зерноочисних машин викликає необхідність використання на технологічних лініях для післязбиральної обробки спеціальних зерноочисних машин для доочищення зернових сумішей. Це призводить до підвищення собівартості зернової сировини, знижує продуктивність, не завжди забезпечує отримання зерна й насіння з високими показниками якості. Тому пошук нових ознак розділення та високоефективних

робочих органів зерноочисних машин для очищення й сортування зерна є актуальною задачею.

Для інтенсифікації різноманітних процесів механічні коливання застосовують часто. Серед них: сепарування, перемішування, різання, розпушення та інші. В галузі сепарування сумішей вібрація використовується досить поширено. Умовно машини для виконання вібраційного сепарування за принципом дії поділяють на саме вібраційної та віброударної дії. Відмінність між ними полягає в тому, що в першому випадку розподіл матеріалу відбувається в основному за рахунок різниці коефіцієнтів тертя, а в другому – різниці коефіцієнтів відновлення при ударі.

Аналізом літературних наукових джерел встановлено, що в Україні абсолютний пріоритет в дослідженнях вібраційної дії на ворох насіння належить Харківській науковій школі (ХНТУСГ ім. Петра Василенка). Передусім це роботи П.М. Заїки, Л.М. Тищенко, В.П. Ольшанського, Ю.О. Манчинського, Н.В. Бакума. Широко відомі також фундаментальні праці П.М. Василенка, Г.Е. Листопада, И.И. Блехмана.

### **6.1.1. Поняття та класифікація методів сепарування зернових сумішей**

Сепарування – одну з найважливіших технологічних операцій на підприємствах зберігання і переробки зерна – використовують для видалення зі зерна домішок у зерноочисних відділеннях млинів, на крупозаводах та при підготовці комбікормової сировини; в розмельних відділеннях при сортуванні продуктів подрібнення, збагачення проміжних продуктів подрібнення зерна, в луцильному відділенні крупозаводів при розділенні зерна на фракції, при сортуванні продуктів луцення, шліфування, дроблення; на комбікормових заводах при сортуванні компонентів комбікормів; в усіх технологіях під час контрольних операцій. Операція сепарування впливає на ефективність проведення практично всіх технологічних операцій, а також на якість готової продукції, рівень використання сировини, на ефективність проведення технології в цілому.

Сепарування, або розділення вихідної суміші сипучого матеріалу на більш однорідні фракції, супроводжується в процесі виготовлення борошна, крупи та комбікормів. Призначення та задачі сепарування досліджували в своїх роботах (В.П. Ольшанський, С.И. Кучеренок, В.В. Бурлака, 2009), які дійшли висновку, що:

1) очищення зерна та іншої сировини від домішок, небажаних у готовій продукції, оскільки вони знижують її якість. У деяких випадках домішки мопогіршують умови зберігання, транспортування зерна, а також його переробки. Крупні мінеральні та металомагнітні домішки можуть стати причиною аварій, запалень та вибухів на переробних підприємствах;

2) сортування вихідної зернової суміші на фракції за крупністю для переробки в продукти різного призначення. Наприклад, видалення дрібного зерна для використання в комбікормовій технології, а крупного – для виробництва високоякісного борошна;

3) поділ зерна на фракції для певної переробки в продукцію однакового призначення, але з метою оптимізації подальших операцій. Наприклад, операція попереднього сортування зерна гречки на фракції для оптимізації процесу лущення та круповідокремлення;

4) видалення кінцевих продуктів технології, наприклад борошна чи крупи в технологічному процесі борошномельного чи круп'яного заводу;

5) видалення проміжних продуктів технології (напівпродуктів) з метою їх подальшої окремої переробки;

6) збагачення проміжних продуктів по крупності – крупок та дунстів у технології борошна та поділу ядра й зерна в технології крупи;

7) контрольне сепарування кінцевих продуктів з метою вловлювання випадкових домішок, надання однорідності кінцевому продукту, а також видалення якісного зерна з відходів.

Сепарування сипких сумішей можливо, якщо:

➤ у вихідній суміші є подільні компоненти, які можуть бути виділені в даному сепараторі;

➤ суміш, що знаходиться в сепараторі, постійно розпушують, аби в середині її могли утворюватися порожнечі достатніх розмірів для проходження окремих частин з внутрішніх шарів до периферійного шару, який межує з поверхнею розділення, наприклад зі ситом, трієрною поверхнею тощо.

Фізичні ознаки, по яких частинки суміші суттєво відрізняються, наприклад геометричні розміри, швидкість витання, можна з найвищою ефективністю використовувати в організації процесу сепарування.

На практиці для організації процесу сепарування здебільшого використовують такі фізичні ознаки, за якими розрізняють матеріал, що сепарується (Манчинський Ю.О. та інші 2008):

- максимальний розмір – довжина;
- максимальний розмір найбільшого за площею поперечного перерізу перпендикулярно довжині – ширина;
- мінімальний розмір того самого перерізу – товщина;
- форма;
- щільність;
- пружність;
- тертя об поверхню;
- магнітні властивості;
- колір та електростатичні властивості.

При організації процесу сепарування зазвичай пов'язують в єдине ціле ознаки різниці компонентів, що розділяються, спосіб сепарування та сепаруючі машини – табл. 6.1 (Ольшанський В.П та інші 2009).

Як правило, зернові суміші та суміші продуктів переробки зерна мають частинки, достатньо близькі за щільністю. І це дозволяє стверджувати, що в разі ситового сепарування переважало самосортування за крупністю (сегрегація). Крім щільності та крупності, на ефективність сепарування впливають форма, стан поверхні частинок, товщина шару та граничне навантаження на робочий орган, частота, амплітуда коливань та інші фактори. За попереднього сепарування в технології борошна, крупи та комбікормів має переваги ситове сепару-

вання, але в технології крупи й комбікормів при розділенні продуктів луцання з високою ефективністю використовується сепарування на вібраційних сортувальних столах.

Таблиця 6.1. Класифікація способів сепарування

Ознака різниці частин	Спосіб сепарування	Машина	Характерний спосіб застосування
1	2	3	4
Довжина	Трієрування	Трієри	Очистка зерна від вівсюга, куколю, видалення ядра вівса з риса та продуктів луцання
Ширина	Просіювання на ситах з круглими та квадратними отворами	Ситові зерноочисні сепаратори	Очистка зерна від домішок, поділ зерна на фракції
Товщина	Просіювання на ситах з прямокутними отворами	Ситові зерноочисні сепаратори	Очистка зерна від домішок
Щільність, коефіцієнт тертя	Поділ у псевдорозрізженому стані	Вібропневматичні каменевідбірники, пневмосортувальні столи	Очистка зерна, крупи від мінеральних домішок, поділ зерна та ядра в продуктах луцання
Швидкість обертання	Пневматичне сепарування	Аспіратори, пневмоканали	Очистка зерна від легких домішок, видалення щуплого зерна
Швидкість обертання, щільність, коефіцієнт тертя	Поділ за зниженням щільності ендосперму та оболонки	Ситовийні машини	Сепарування продуктів подрібнення по добротності (збагаченні)
Розміри	Просіювання на горизонтальних ситах	Розсівні млинні та круп'яні	Сортування продуктів подрібнення
Пружність, коефіцієнт тертя, щільність	Віброударне сепарування	Падді-машини, інші круповідокремлювачі	Видалення ядра з продуктів луцання, контроль круповідокремлення
Форма, коефіцієнт тертя, щільність	Вібраційне переміщення по коміркових поверхнях	Комірковий круповідокремлювач	Видалення ядра з продуктів луцання
Щільність	Самосортування на конічних поверхнях	Каменевідокремлювач дисковий	Очистка зерна від мінеральних домішок
Щільність, коефіцієнт тертя, розміри	Просіювання на нерухомих похилих ситах	Самоплинні круповідокремлювачі	Відбір ядра з продуктів луцання
Магнітні властивості	Магнітне сепарування	Магнітні сепаратори	Очистка від металомагнітних домішок

Сепаратором для розділення сипких сумішей прийнято вважати машину, робочими органами якої є сита з різноманітними отворами, чарунчаста поверхня, пневмосепарувальні камери, магніти, електростатичні елементи, вібростоли та інше обладнання. Зазначимо, що кожен із перелічених органів можна розглядати окремо, як самостійно працюючий сортувальний пристрій, у свою чергу розподілений на низку аналогічних мікропристроїв. Відповідно існуючі сепаратори можна умовно розподілити на три групи: елементарні, прості та складні (Ольшанський В.П. та інші 2009).

Прості сепаратори представляють собою поєднання елементарних сепараторів, що розділяють суміш на дві фракції за однією ознакою. До них відносять ситову поверхню з однаковими за розмірами та формою отворами, трієрну поверхню з однаковими за розмірами та формою чарунками, пневмосепарувальний канал прямокутного та кільцевого перетину, одноразової дії, магнітний сепаратор одноразової дії, деку пневматичного сортувального столу та інше.

Складні сепаратори – декілька простих сепараторів, об'єднаних в одній машині (пристрій, установка). У них сепарують суміші на три та більше фракцій за декількома ознаками. Операції розділення суміші за різними ознаками частинок у складному сепараторі можуть здійснюватися послідовно, паралельно чи комбіновано.

### **6.1.2 Поняття про подільність зернових сумішей**

Можливість сепарування зі заданою ефективністю визначають поділом зерна та сумішей за конкретною ознакою, яка забезпечує найбільш повного розділення вихідної суміші на більш однорідні фракції. Для достовірної оцінки подільності суміші значення ознак оцінюють експериментально та представляють у вигляді варіаційних рядів або варіаційних графіків (полігонів розподілення), отриманих після відповідної обробки статистичних варіаційних рядів.

Кількість разових вимірів повинна бути достатньо великою, щоб забезпечити достовірність отриманої інформації. При представленні експериментальних даних у вигляді статистичних рядів задачу про сепарування вирішують

аналітично; представляючи дані у вигляді полігонів розподілу або гістограм, задачу розв'язують графічно.

Під час вибору способу розділення даної суміші необхідно правильно використовувати геометричні ознаки та фізичні властивості компонентів суміші, в першу чергу ті, які забезпечують найбільш повне розділення суміші на фракції зі заданими показниками якості. Тому більш важливого значення набуває вивчення зміни різноманітних ознак шляхом масових визначень величин: довжини, ширини, товщини, щільності, коефіцієнтів тертя, парусності, форми і та ін.

Результати такого вивчення дозволять вибрати для розділення даної суміші ті з ознак, за якими найбільш різко відрізняються ті компоненти, що нас цікавлять, тобто визначити подільність суміші.

Варіаційні криві двокомпонентної суміші, що складається з основного зерна та дрібних домішок, показані на рис. 6.1.

Заштрихований майданчик між кривою 2 та віссю абсцис відповідає дрібним домішкам, а майданчик між кривою 1 та віссю абсцис – основному зерну. Загальний інтервал  $\Delta_0$  відповідає інтервалу всієї суміші, в якому варіює ознака  $x$ , що вивчається для обох компонентів.

Частина площі, яка обмежена кривою 1, перекривається заштрихованим майданчиком на ділянці з інтервалом, рівним  $\Delta$  (рис. 6.1,а). Відповідно ця частина суміші не може бути розділена за даною ознакою (Бурков А.И., 2002).

Останню частину суміші можна розділити на два прийоми:

– частина основного зерна в чистому вигляді, що відповідає майданчику справа від прямої  $b - b$ , теоретично може бути виділена за робочою ознакою  $D + \Delta$ ;

– частина дрібних домішок у чистому вигляді, що відповідає майданчику зліва від вертикальної прямої  $a - a$ , виділяють за значенням ознаки  $D$ .

Таку суміш тільки частково можна розділити на компоненти в чистому вигляді, тобто її подільність неповна. Отримана суміш має назву – важкороздільна.



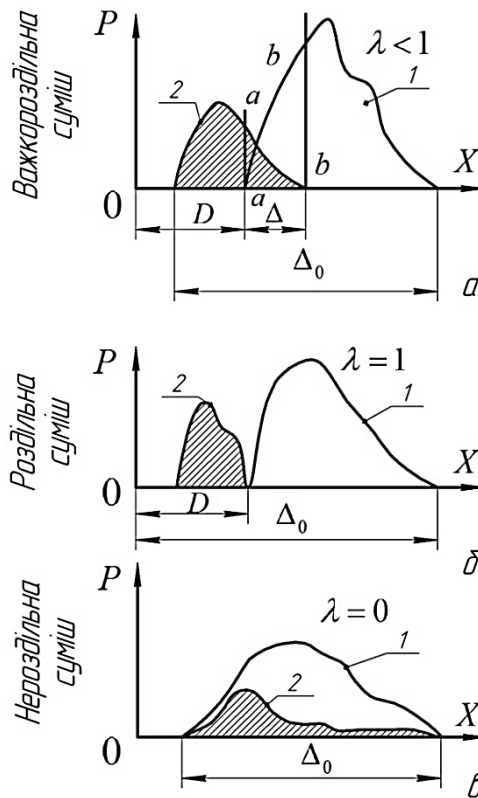


Рис. 6.1. Критерій подільності двокомпонентної суміші:

$a$  – важкороздільна суміш;  $b$  – роздільна суміш;  $\theta$  – нероздільна суміш

Інтервал варіювання ознаки, а саме крайні значення абсцис – дають тільки якісне, але не кількісне уявлення про важкість розділення.

Якісним критерієм подільності суміші домовимося називати відношення інтервалів теоретично можливого розділення компонентів до загального інтервалу суміші.

У нашому випадку подільність двокомпонентної суміші буде характеризуватися таким відношенням (Бурков А.И., Андреев В.Л., 2002).

$$\lambda = \frac{\Delta_0 - \Delta}{\Delta_0} = \frac{1 - \Delta}{\Delta_0}, \quad (6.1)$$

де  $\Delta$  – інтервал перекриття компонентів;

$\Delta_0$  – інтервал суміші.

При сепаруванні зустрічаються такі характерні випадки двокомпонентної вихідної суміші (Бурков А.Н., 2002):

$\Delta < \Delta_0$ , тоді  $\lambda < 1$  – суміш важкороздільна (рис. 6.1,а);

$\Delta = 0$ , тоді  $\lambda = 1$  – суміш роздільна (рис. 6.1,б);

$\Delta = \Delta_0$ , тоді  $\lambda = 0$  – суміш нероздільні (рис. 6.1,в).

На практиці переважають суміші важкороздільні за однією ознакою, тому для їх сепарування використовують декілька ознак, причому операції розділення можуть перебігати послідовно чи паралельно.

Використовувати послідовно дві ознаки  $x$  та  $y$  для сепарування двокомпонентної суміші можна, користуючись кореляційною таблицею, а три ознаки  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – просторовими кореляційними решітками.

### **6.1.3 Технологічний ефект сепарування зернових сумішей**

Для аналізу та оцінки технологічного процесу сепарування сипких сумішей, до яких відносять також зернові суміші, існують методи, які дозволяють отримувати найбільш об'єктивні показники ефекту розділення вихідної суміші на компоненти, що її утворюють.

*Вихідна суміш* – сипка суміш, що надходить в сепаратор для розділення на утворюючі її компоненти.

*Фракція* – суміш, отримана в результаті сепарування та складається з компонентів, що входять до складу вихідної суміші, але і в інших співвідношеннях.

*Чистота фракції* – відносний вміст основного компонента в даній фракції чи на виході.

*Вихід фракції* – відношення кількості матеріалу фракції до кількості вихідної суміші.

*Ступінь видалення компонента* – відношення кількості компонента на виході або у фракції до кількості того ж компонента у вихідній суміші.

Загальна закономірність процесу розділення базується на тому, що, незалежно від принципу роботи простого сепаратора, вихідна суміш у результаті

сепарування розділяється на дві частини (нові суміші), які якісно відрізняються від вихідної суміші (Бурков А.И., 2002; Воронов І.Г. та ін., 1953).

Нові суміші (фракції) за своїм складом відрізняються високою однорідністю за тими ознаками, що були покладені в основу розділення суміші. Так, у результаті пневмосепарування отримують дві фракції, що відрізняються за аеродинамічними властивостями частинок, при просіюванні – за крупністю та інше.

Отже, можна зробити висновок: чим однорідніші отримані фракції за даною ознакою частинок, тим точніше здійснена операція, тобто вище коефіцієнт розділення.

Якість процесу сепарування або ефект розділення оцінюють повнотою виділення кожного з компонентів у чистому вигляді.

Вище було розглянуто операцію очищення при сепаруванні двокомпонентної суміші (Блехман И.И., Джанелидзе Г.Е., 1964) – рис. 6.1,*а*. При цьому до складу вихідної суміші входять два різноманітних за якістю компоненти: один з них «кращий», а інший – «гірший» (домішки), тобто суміші були неоднорідними. До такої суміші належить пшениця зі смітною домішкою.

Завдання операції очищення передбачало відокремлення від суміші гіршого компонента (домішок) з метою збагачення кращого компонента за найменших втрат останнього у відходи.

У процесі сепарування важливе місце займає операція сортування однорідного продукту на класи (сорти) за певними ознаками. Найчастіше продукт сортують на класи за крупністю.

Практично не отримують фракцій з чистотою, що дорівнює одиниці. Критерієм ефекту сепарування слугує показник *E*.

Для виявлення фізичної сутності цього показника розглянемо результати сортування суміші на дві фракції – рис. 6.2 (Бурков А.И., 2002).

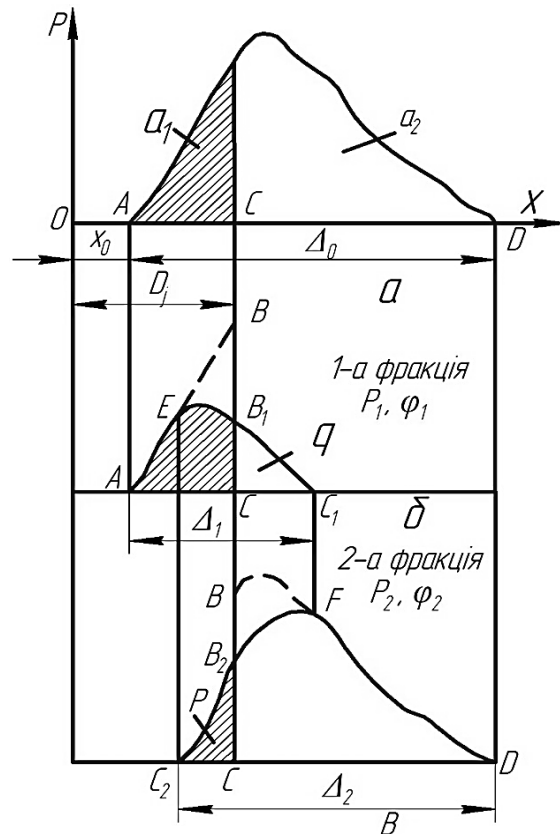


Рис. 6.2. Характеристика розділення суміші на дві фракції:

$a$  – вихідна суміш;  $b$  – перша фракція;  $в$  – друга фракція

Припустимо, що площа, обмежена  $ABD$  та віссю  $x$ , представляє в масштабі кількість вихідної суміші  $Q = 1$ , що надходить до простого сепаратора за одиницю часу (рис. 6.2, $a$ ). Указану суміш потрібно розділити за ознакою  $x$  на два компоненти:  $a_1$  (площина  $ABC$ ) та  $a_2$  (площина  $BCD$ ). При цьому для розділення суміші прийнятий робочий параметр  $D_i$ , що пролягає (пряма  $BC$ ) між компонентами.

У результаті сепарування отримано дві фракції: перша фракція (рис. 6.1, $b$ ) у кількості  $P_1$  (площина  $AEB_1C_1$ ); друга фракція (рис. 6.2, $в$ ) – у кількості  $P_2$  (площина  $C_2B_2FD$ ).

У загальному випадку (як результат недоскональності сепарування) кожна з отриманих фракцій складається з частинок (зернівок) обох компонентів. Перша фракція містить деяку частину  $q$  (площина  $B_1C_1C =$  площині  $BFB_2$ ) частин, що належать компоненту  $a_2$ , а інша фракція –  $p$  (площина  $C_2B_2C =$  площині  $EBB_1$ ) частинок, що належать компоненту  $a_1$  (Бурков А.И., 2002).

Чистота першої фракції дорівнюватиме:

$$\varphi_{11} = \frac{P_1 - q}{P} = \frac{1 - q}{P}; \quad (6.2)$$

чистота другої фракції:

$$\varphi_{22} = \frac{P_2 - p}{P_2} = \frac{1 - p}{P_2}. \quad (6.3)$$

Відповідно ступінь видалення першого компонента в першу фракцію становитиме

$$\eta_{11} = \frac{\varphi_{11} \cdot W_1}{a_1}; \quad (6.4)$$

другого компонента в другу фракцію:

$$\eta_{22} = \frac{\varphi_{22} \cdot W_2}{a_2}, \quad (6.5)$$

де  $W_1 = \frac{P_1}{Q}$  – вихід першої фракції;

$W_2 = \frac{P_2}{Q}$  – вихід другої фракції.

Наведені результати підтверджують, що величина показників видалення (6.4) та (6.5) завжди менше одиниці.

Ефект сепарування залежить від геометричних характеристик елементів суміші та фізико-механічних властивостей (наприклад, вологість зерна); від конструкції сепаратора та режиму його роботи; від вимог, що висуваються до продукту сепарування, допустимого вмісту домішок у готовому продукті й т.н.. Ці вимоги регламентуються відповідними державними стандартами, продик-

товані результатами розділення, забезпечуючими сепараторами, та обумовлені подільністю вихідної суміші.

Можна вважати, що за ідеальної роботи простого сепаратора, тобто оптимального режиму, вихідна суміш буде розділена на дві фракції, чистота яких характеризується максимальними показниками  $a_{11}$  та  $a_{22}$ . Величини їх кількісно визначають подільність даної вихідної суміші в даному сепараторі. Якщо сепаратор працює на оптимальному режимі, то величини показників  $\varphi_{11}$  та  $\varphi_{22}$  (чистота фракцій) завжди будуть менші за вказану. Оскільки  $\varphi_{11} > a_1$ , вміст першого компонента в першій фракції (її чистота) збільшиться на  $\varphi_{11} - a_1$  порівняно з умістом цього компонента у вихідній суміші.

Гранично можлива відносна кількість першого компонента в першій фракції більше кількості у вихідній суміші на  $a_{11} - a_1$ . Як наслідок, ступінь збагачення першої фракції буде рівний відношенню фактичного приросту в ній концентрації першого компонента до гранично можливої, тобто  $\frac{\varphi_{11} - a_1}{a_{11} - a_1}$ .

Відповідно ступінь збагачення другої фракції становитиме:  $\frac{\varphi_{22} - a_2}{a_{22} - a_2}$ .

Загальний ефект сепарування визначимо як середньозрівноважений ступінь збагачення обох фракцій:

$$E_2 = W_1 \cdot \frac{\varphi_{11} - a_1}{a_{11} - a_1} + W_2 \cdot \frac{\varphi_{22} - a_2}{a_{22} - a_2}. \quad (6.6)$$

В окремому випадку, коли вихідна суміш може бути розділена в даному сепараторі на складові її компоненти в чистому виді, тобто коли показники подільності суміші  $a_{11} = a_{22} = 1$ , формула (6.6) набуває такого вигляду:

$$E_2 = \frac{(\varphi_{11} - a_1) \cdot (a_1 - \varphi_{12})}{a_1(1 - a_1) \cdot (\varphi_{11} - \varphi_{12})}, \quad (6.7)$$

де  $\varphi_{12}$  – вміст першого компонента в другій фракції.

Формулу (6.7) можна запропонувати в такому вигляді:

$$E_2 = \varphi_{11} + \varphi_{22} - 1. \quad (6.8)$$

Поширюючи висновок (6.6) на складні суміші, загальний технологічний ефект сепарування  $n$  – компонентної суміші на  $n$  фракцій можна запропонувати у вигляді:

$$E_n = \sum_{i=1}^n W_i \frac{\varphi_{ii} - a_i}{a_{ii} - a_i}, \quad (6.9)$$

де  $a_{ii}$  – чистота  $i$ -ої фракції за ідеального сепарування, або показник подільності вихідної суміші;

$a_i$  – вміст  $i$ -го компонента у вихідній суміші;

$\varphi_{ii}$  – чистота  $i$ -ої фракції;

$W_i$  – вихід  $i$ -ої фракції.

В окремому випадку, коли показники подільності суміші  $a_{ii} = 1$ , формула (6.9) набуває вигляду:

$$E_n = \sum_{i=1}^n W_i \frac{\varphi_{i1} - a_1}{1 - a_1}. \quad (6.10)$$

#### **6.1.4. Аналіз конструкцій віброфрикційних сепараторів**

Процес розділення компонентів насіннєвих сумішей на фрикційній неперфорованій поверхні полягає в тому, що насіння округле, більш пружне і менш шорсткувате переміщується вниз по фрикційній робочій поверхні, а плоске, менш пружне та більш шорсткувате рухається нагору (Гольцяпин В.Я., 2000).

Робочі органи цих сепараторів виконують або поступальний, або просторовий рух, проте останні поширення не отримали через складність конструкції.

Робочі поверхні віброфрикційних сепараторів можуть бути плоскими, східчастими, криволінійними. Схема віброфрикційного сепаратора з циліндричним робочим органом містить циліндр 3, облицьований фрикційним матеріалом і встановлений на вісь 2, що спирається на пружні підвіски 1 (рис. 6.3). На осі робочого органа жорстко закріплений віброзбудник 4, що надає руху осі 2, а отже, і циліндру 3. Привід віброзбудника здійснюється від електродвигуна через гнучкий вал.

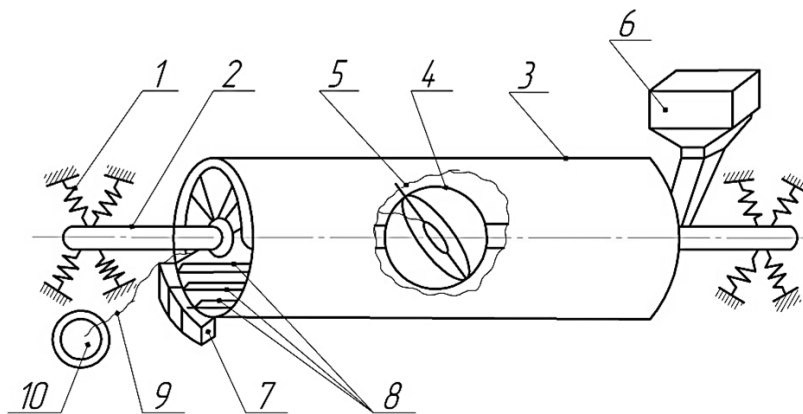


Рис. 6.3. Принципова схема сепаратора з циліндричною робочою поверхнею:

1 – пружна підвіска; 2 – вісь; 3 – циліндр; 4 – віброзбудник; 5 – дебаланс;  
 6 – живильний пристрій; 7 – приймальники продуктів розділення; 8 – дільники;  
 9 – гнучкий вал; 10 – електродвигун

Технологічний процес сепаратора розпочинається зі живильного пристрою 6, коли вихідна суміш насіння надходить у циліндр 3. Під дією вібрації компоненти суміші переміщуються уздовж циліндра; піднявшись по його поверхні до тих утворюючих, дотичні до яких у площинах, перпендикулярні вісі циліндра, дорівнюють граничним кутам підйому.

Компоненти суміші, що мають різні фізико-механічні властивості, рухаються уздовж цих утворюючих на різній відстані від нижньої утворюючої циліндра, розділяються дільниками і надходять в різні приймальники продуктів 7.



Частково ці недоліки усунуті в сепараторі, що включає пакет увігнутих фрикційних дек, виконаних зі скосом у напрямку вібрації (Гальтяпин В.Я., 2000). Деки встановлюють одна під одною, що дозволяє підвищити продуктивність сепарації. Однак невисока якість сепарації і завищена споживана потужність є основними недоліками цього сепаратора. Для усунення цих недоліків запропонований віброфрикційний сепаратор, що включає деки, виконані зі скосом у напрямку вібрації, приймальники продуктів розділення, розміщені під більшою стороною пакета і завантажувальне пристосування, встановлене в його прямому куті.

Сепаратор складається з фрикційних увігнутих неперфорованих дек, виконаних зі скосом у напрямку вібрації і набраних у пакет 2, встановлений на рамі за допомогою пружної підвіски (рис. 6.4). Для приводу пакета поверхонь у коливальний рух призначений вібробудник, вали якого одержують коливальний рух від електродвигуна через клинопасову передачу, проміжну передачу і пружну муфту. Регулювання поперечного кута нахилу здійснюється механізмом. Подача вихідного матеріалу на деки, що сепарують, здійснюється за допомогою завантажувального пристосування. Розділені фракції надходять у приймальники продуктів розділення.

Сепаратор розпочинає свою роботу, коли вихідна суміш із завантажувального пристосування надходить на кожну робочу поверхню. Під дією коливань, залежно від фізико-механічних властивостей, компоненти суміші переміщуються з різними траєкторіями і надходять у приймальники продуктів розділення у час досягнення ними граничного кута підйому, що підвищує якість сепарації. Виконання деки 1 зі скосом на плані трикутника дозволяє збільшити довжину розвантажувальної крайньої деки (за тих самих розмірів сторін деки). У результаті цього кількість приймальників продуктів розділення і кількість фракцій уздовж розвантажувальної крайки можна збільшити. Це також підвищує якість сепарації.

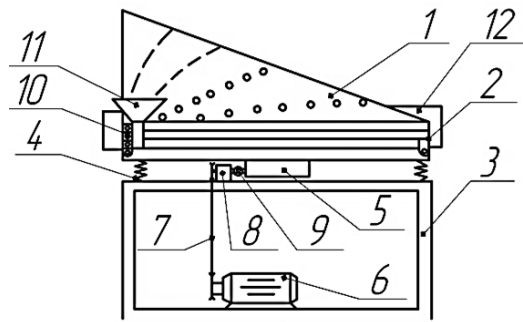


Рис. 6.4. Конструктивна схема віброфрикційного сепаратора:

1 – робочі поверхні; 2 – пакет робочих поверхонь; 3 – рама; 4 – пружна підвіска; 5 – віброзбудник; 6 – електродвигун; 7 – клинопасова передача; 8 – проміжна передача; 9 – муфта; 10 – механізм встановлення кута нахилу пакету робочих поверхонь; 11 – завантажувальне пристосування; 12 – приймальники продуктів розділення

Більш простими за конструкцією є сепаратори з плоским похилим робочим органом, що робить прямолінійні спрямовані коливання, під гострим кутом з напрямком зростання підйому робочої поверхні.

При сепаруванні зернової суміші, переважно з пружними властивостями її компонентів, на віброуючій похилій поверхні, технологічний процес може бути інтенсифікований за допомогою встановлення під поверхню, що сепарує, еквідистантно її розташованої та жорстко з нею зв'язаної, відбивної поверхні (рис. 6.5).

Підвищити якість розділення насінневого матеріалу можна за рахунок запобігання скупчування важковідокремлюваних часток у зоні живильників.

Віброфрикційний сепаратор складається з фрикційної поверхні, над якою змонтовані живильники і очисники. У поздовжнього обріза поверхні встановлений додатковий приймальник. Живильнику надається рух за допомогою ланок і ковзаник.

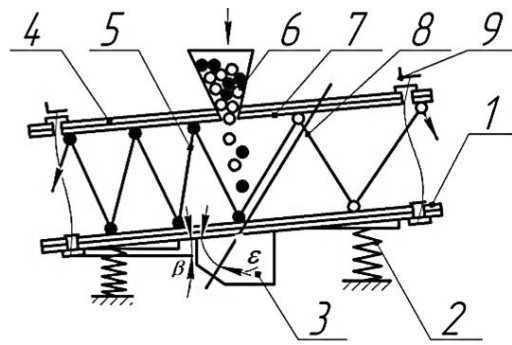


Рис. 6.5. Схема сепаратора з відбивною робочою поверхнею:

- 1 – робоча поверхня; 2 – пружина; 3 – віброзбудник; 4 – відбивна поверхня;  
 5 – траєкторія руху округлого, гладкого насіння; 6 – живильний пристрій;  
 7 – фрикційний матеріал; 8 – траєкторія руху плоского, шорсткуватого насіння  
 та домішок; 9 – гвинтовий регулювальний пристрій

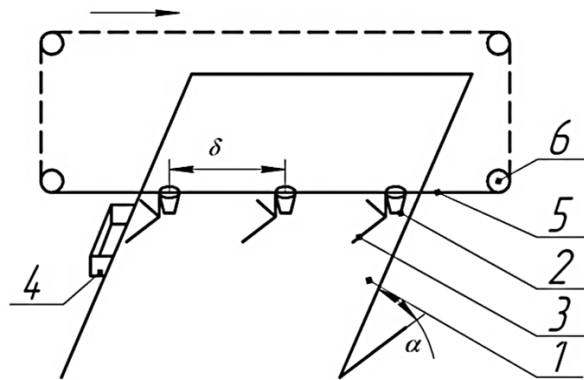


Рис. 6.6. Віброфрикційний сепаратор для важковідокремлюваних сумішей:

- 1 – фрикційна поверхня; 2 – живильник; 3 – очисник; 4 – додатковий приймаль-  
 ник; 5 – ланки; 6 – ковзанки

Для виключення можливості захоплення в протилежні фракції насіння, а також для запобігання скупчуванню насіння, швидкість якого невелика, в області живильника необхідно очищати робочу поверхню від цього насіння. Такі випадки можливі, якщо живильник рухається по поверхні (при цьому можливий будь-який напрямок, крім збіжних з поздовжнім обрізом), а за ним через визначений проміжок часу по поверхні рухається очисник, що забирає з поверхні усе

насіння, що знаходиться в зоні захоплення, і зсипає його в додатковий приймальник. При цьому можливий коловий рух живильників і очисників над поверхнею. За допомогою сполучних ланок 5 і ковзаник 6, обертальний рух від ковзаник може бути переданий від електродвигуна, що надає руху вібростолу.

Одним з основних недоліків розглянутих сепараторів є розділення насінневого матеріалу лише на дві фракції. Підвищення продуктивності і якості розділення отримують у разі використання сепараторів з поздовжньо-поперечним кутом нахилу робочого органа до горизонту. Конструктивна відмінність цих сепараторів від згаданих полягає в наявності двох механізмів регулювання положення робочої поверхні (деки) у поздовжньому і поперечному напрямках (рис. 6.7).

Така конструктивна зміна викликає істотні зміни в процесі розділення зернових сумішей. У сепараторах з подвійним кутом нахилу робочої поверхні насіння, що має відмінність фізико-механічних властивостей, переміщується по деці за різними траєкторіями, унаслідок чого знижуються кількість зіткнень і взаємне захоплення насіння в різнойменні фракції. Це дозволяє підвищити продуктивність і якість сепарації.

Сепаратор містить фрикційну поверхню, закріплену на вібростолі 2, що встановлений на пружинах, закріплених на корпусі 4. До вібростолу жорстко кріпиться вібростол. Поздовжній і поперечний кути нахилу робочої поверхні до горизонту регулюються механізмами. Вібростол 5 приводиться в рух від електродвигуна 8 через клинопасову передачу 9, варіатор 10, проміжну передачу і пружну муфту. Для збору продуктів розділення служать приймальники. Подача насінневої суміші здійснюється з живильного пристрою.

Технологічний процес сепаратора здійснюється таким чином (рис. 6.7). Вихідна насіннева суміш з живильного пристрою 13 подається на робочу поверхню 1. За рахунок спрямованих коливань і подвійного нахилу поверхні 1 відбувається переміщення компонентів суміші по різних траєкторіях, залежно від їх фізико-механічних властивостей. При цьому у верхні приймальники продуктів розділення по траєкторіях 15 переміщуються більш шорсткувате, плоске і

менш пружне насіння та домішки. Найбільш округле, гладке і пружне насіння надходить по траєкторіях 16 у нижні приймальники. Насіння, що має проміжні значення цих властивостей, надходить у проміжні приймальники по траєкторіях 17. Насіннєвий матеріал, що надійшов у проміжні приймальники, за необхідності направляють на повторну обробку, оскільки тут утримуються компоненти суміші різнойменних фракцій.

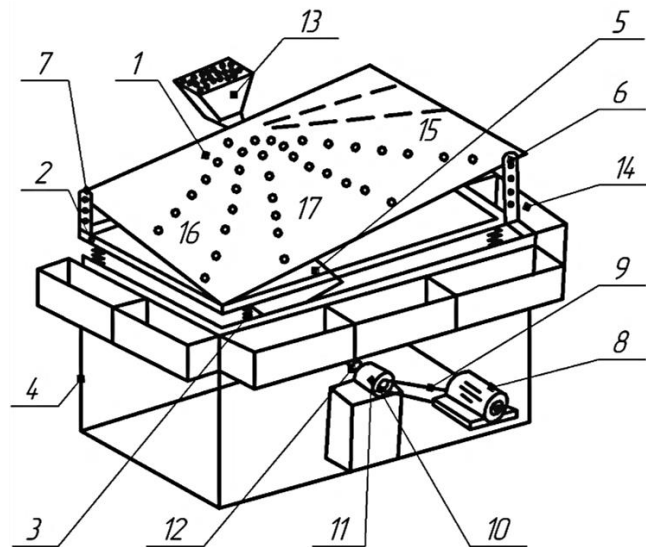


Рис. 6.7. Принципова схема сепаратора з поздовжньо-поперечним кутом нахилу робочого органа до горизонту:

1 – фрикційна поверхня; 2 – вібростіл; 3 – пружини; 4 – корпус; 5 – віброзбудник; 6, 7 – механізм регулювання поздовжнього і поперечного кутів нахилу; 8 – електродвигун; 9 – клинопасова передача; 10 – варіатор; 11 – проміжна передача; 12 – муфта; 13 – живильний пристрій; 14 – приймальники продуктів розділення.

## 6.2. Теоретичне обґрунтування поділу продуктів лущення зерна вівса за сукупністю фізико-механічних властивостей

Сепарування зернопродуктів та інших сипких сумішей майже завжди виконується в умовах стисненого руху частинок, геометричні та фізико-механічні

властивості яких варіюють за випадковими законами, а взаємодія частинок в операціях, що виконуються, носить також випадковий характер. Важливо і те, що характеристики зернового складу (диференціальні та сумарні показники) та показники якості операцій сепарування (наприклад, видалення, засміченість, відходи), що застосовуються в технології переробки сипучих матеріалів по суті та навіть по формі відображають випадковий характер розподілу компонентів суміші та реалізованих процесів сепарування.

Ці особливості розглянутих процесів виключають їх можливість детермінованого (динамічного) описання і є причиною повної відсутності методів розрахунку показників якості сепарування, заснованих на будь-яких динамічних моделях процесу.

Спроби описання процесів сепарування на основі обговорення руху ізольованої частинки хоча і давали в окремих випадках корисні дані про можливий характер руху частинки суміші на робочому органі (наприклад, траєкторії частинок, їх швидкості, моменту відриву), але, певна річ, не могли привести до розрахунку показників технологічної ефективності процесу за конструктивними, механічними та завантажувальними характеристиками обладнання. А саме з указаних причин під час опису операцій сепарування виявилось природним і доцільним використовувати уявлення та апарат теорії випадкових процесів.

Основні положення статистичної теорії сепарування та додатки до розрахунку ефективності процесу вібросепарування були викладені в 1960 році. В останній період основи цієї теорії були розвинені, удосконалені методи розрахунку, що витікають із неї, розширені межі використання (Гортинський В.В. та ін., 1980).

Нижче викладаються результати опису та розрахунку ефективності процесу сепарування, головним чином для застосування до операцій сортування на сепаруючих пристроях з відбивними стінками.

Реалізація вказаних питань пов'язане з використанням наступного загального підходу до опису кінетики різних процесів та операцій переробки дисперсних матеріалів.

### 6.2.1. Опис технологічного процесу роботи падді-машини

Робочі органи падді-машини – канали з гладким днищем та зигзагоподібними стінками (рис. 6.8). Зигзагоподібні стінки утворені трикутними призмами з перемичками, що встановлені в певному порядку. Канали мають невеликий нахил у бік основи призми. Дещо вище середини каналу його днище має злом (рис. 6.8,в).

Продукт потрапляє в місце зламу. Канали виконують прямолінійні коливання в горизонтальній площині, перпендикулярній їх поздовжній осі. Внаслідок такого руху продукт, що знаходиться в каналі, по чергово відбивається до правої та лівої стінок. При ударах об стінки виконується самосортування та розшарування суміші. Необрушені зерна, що знаходяться у верхніх шарах, унаслідок ударів переміщуються по каналу догори, виділяючись верхнім сходом. Лушнені зерна, що знаходяться внизу суміші, поступово зміщуються вниз і виходять з каналу, утворюючи так званий нижній сход.

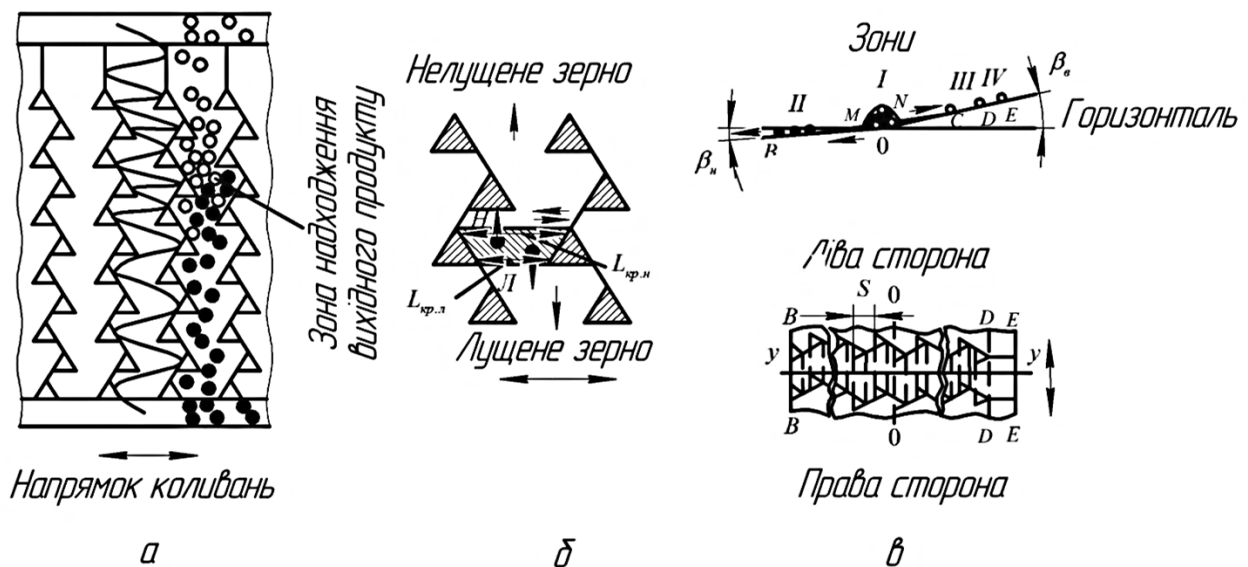


Рис. 6.8. Сортувальний стіл падді-машини:

*a* – схема розташування каналів; *б* – схема елемента каналу в плані; *в* – робочий канал (перетин); *I* – зона сепарування; *II, III, IV* – зони виводу фракцій

Незважаючи на широке використання падді-машини для сепарування різноманітних сипких продуктів, й до теперішнього часу, відсутні інженерні методи їх технологічного розрахунку і не існує єдиної точки зору на фізичну сутність процесу, що відбувається в падді-машинах.

На частину продукту, що потрапила до каналу, діють сили інерції, які виникають при ударі частинок об бокові стінки. Сили тяжіння та сили тертя між стінками, дном та частинкою. Сили співудару частинок об бокові стінки направлені орієнтовно перпендикулярно боковим стінкам елементу і намагаються переміщувати частинку вгору, так як одна з складових сил направлена вгору, а інша – паралельно основі. Сила тяжіння викликає рух частинки під уклон, униз (Ольшанський В.П. та ін., 2009).

За певних значень кута нахилу, частоти та амплітуди коливань ці сили врівноважуються і частинка, здійснюватиме гармонічні коливання в певному місці каналу, де відстань між стінками дорівнює  $L_{кр}$  (рис. 6,8,б), яка називається критичною координатою. В реальних умовах такий режим руху частинки буде нестійким, і будь-яке збурююче зусилля виведе частинку з цього режиму. Якщо частинка випадково опиниться вище критичної координати, то сила ударів у цій зоні зросте, а частинка буде переміщуватися вгору. Навпаки, якщо частинка опиниться нижче критичної координати, то вона буде переміщуватися вниз. Критична координата визначається не тільки параметрами каналу, установочними і кінематичними параметрами машини, але й ударно-фрикційними властивостями частинки. Чим більш пружні частинки, тим менше величина  $L_{кр}$ , тобто нижче вона розташована. Якщо більш пружну частинку помістити між критичними координатами, то вона буде переміщуватися вгору, оскільки знаходитиметься вище своєї координати. А менш пружна частинка з'явиться нижче своєї критичної координати і буде переміщуватися вниз (Гортинський В.В., Абрамов А.В., 1972).

Як наслідок, висота трапеції повинна бути декілька менше різниці критичних відстаней. В цьому випадку можлива достатньо висока ефективність відо-



кремлення. Послідовне з'єднання ряду елементів у каналі збільшує ймовірність направленої руху частинок з різноманітними властивостями.

Ефективність відокремлення суміші висока в тому випадку, коли за рахунок самосортування більш пружні частинки (звичайно нелущені зерна) опиняються у верхньому шарі суміші, що і спостерігається в реальних умовах. Фізичні властивості зерен та їх суміші значно відрізняються. Дослідження ударно-фрикційних властивостей окремих обрушених та необрушених зерен показало, що в середньому вони відрізняються, але варіаційні криві цих властивостей значно перекривають одна одну, значно ускладнюючи процес відокремлення.

### **6.2.2. Математичне моделювання процесу сепарування сипких матеріалів**

Найбільш глибокі дослідження процесу в падді-машинах проведені ВНИИЗ та Московським державним університетом харчової промисловості (Гортинський В.В., Абрамов Е.В., 1972; Гортинський В.В. та ін., 1980). У результаті розроблені теоретичні передпосилання, виявлені основні фактори та параметри, а також ударно-фрикційні властивості різних зернових сумішей, що впливають на ефективність процесу. Саме це дозволило підготувати рекомендації з оптимізації режимів машин, необхідні в експлуатації, та пропозиції з удосконалення деяких елементів їх конструкції.

Робочий канал падді-машини в цих дослідженнях розглядається як сукупність робочих елементів трапецоїдної форми, які звернені довгою основою донизу (рис. 6.8, *а, б*) та утворюється відбивними стінками, які розташовані під кутом  $\alpha = \text{const}$  до поздовжньої осі каналу, та плоским днищем, ломаним в зоні прийому продукту таким чином, що в нижній частині каналу днище має кут нахилу до горизонту  $\beta_n$ , а у верхній частині –  $\beta_e$ . У сучасних конструкціях машин  $\beta_e > \beta_n$ . (Гортинський В.В., Абрамов А.В., 1972).

Вхідна суміш потрапляє зверху в центральну частину каналу та утворює в зоні *I* (*АОС*) сипке тіло, яке формується під дією коливань каналу. Внаслідок віброударної дії суміш самосортується: частинки малих розмірів та великої

щільності занурюються вниз, а частинки великих розмірів та малої щільності випливають наверх. Приблизна лінія відокремлення компонентів суміші позначена  $MN$ .

За встановленого процесу частинки більшої щільності, лушені зерна направляються в нижню частину каналу та виводяться як нижній сход, а частинки меншої щільності (нелушені зерна) рухаються догори та виводяться верхнім сходом. Виділимо один робочий елемент. Розглянемо в ньому режим регулярного періодичного руху матеріальної частинки масою  $m$ , при якому вона послідовно б'ється об ліву та праву стінки в тих самих симетрично розташованих точках (рис. 6.9). Ударна взаємодія частинки зі стінками покладено пружним, що враховується, згідно з гіпотезою Ньютона, коефіцієнтом відновлення  $R$  нормальною складовою швидкості:

$$R = \frac{v_2^n}{v_1^n}, \quad (6.11)$$

де  $v_1^n$  та  $v_2^n$  – нормальна складова відносної швидкості частини до та після удару, відповідно.

Зміну дотичної, яка відповідає швидкості при ударі, враховуємо коефіцієнтом миттєвого тертя  $\lambda$  (Гортинский В.В. та ін., 1980).

$$1 - \lambda = \frac{v_2^\tau}{v_1^\tau}, \quad (6.12)$$

де  $v_1^\tau$  та  $v_2^\tau$  – дотичні складові відносної швидкості частинки до та після удару, відповідно.

Час зіткнення приймаємо безмежно малим, а умови удару об праву та ліву стінки симетричними. Індокси « $l$ » та « $n$ » – застосуємо відповідно для лівої та правої стінок, « $1$ » та « $2$ » – до та після зіткнення частинки зі стінкою.

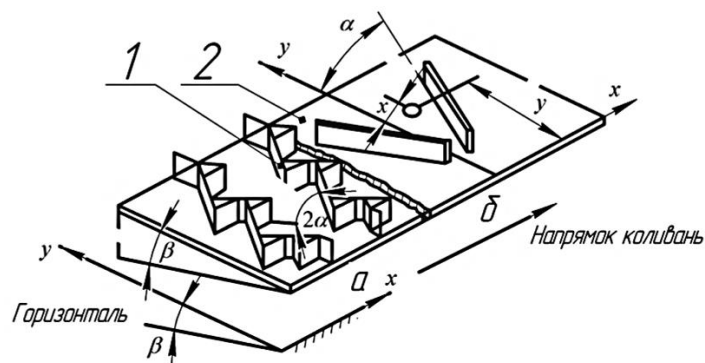


Рис. 6.9. Переміщення частинки в робочому каналі падді-машини:

*a* – принципний устрій каналу; *б* – схема сил, що діють на частинку; *1* – відбивна стінка; *2* – днище каналу

Виразимо переносний рух (рух столу) гармонічними коливаннями, запишемо диференціальне рівняння відносного руху частинки в інтервалі часу між двома послідовними зіткненнями:

$$m\ddot{x} = mA\omega^2 \sin \omega t - F_x; \quad (6.13)$$

$$m\ddot{y} = -mg \sin \beta - F_y, \quad (6.14)$$

де  $x, y$  – координати частинки у відносній (рухомій) системі, жорстко зв'язаної зі столом;

$A$  – амплітуда коливань;

$\omega$  – кутова частота;

$\beta$  – кут нахилу столу до горизонталі;

$g$  – прискорення сили тяжіння;

$F_x, F_y$  – проекції сили тертя на осях  $X$  та  $Y$ :

$$F_x = fmg \cos \beta \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}, \quad (6.15)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання,

$$F_y = fmg \cos \beta \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}. \quad (6.16)$$

Траекторію відносного руху частинки між відбивними стінками робочого каналу за періодичного регулярного режиму наведено на рис. 6.10.

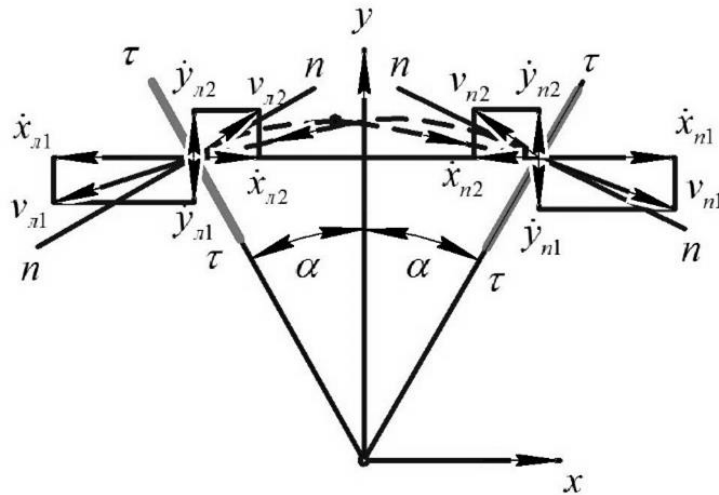


Рис. 6.10. Траекторія відносного руху частинки між відбивними стінками робочого каналу за періодичного регулярного руху

Розв'язок рівнянь (6.13) та (6.14) після перетворень та підстановок ряду коефіцієнтів дозволив отримати значення переміщень:

$$x_n = -x_n = \frac{\pi\alpha}{2\omega} \left( b - \frac{c}{2} \right) - A \sqrt{1 - \left( \frac{ac}{2A\omega} \right)^2}. \quad (6.17)$$

Тут, крім відомих параметрів,

$$a = \frac{\pi g \sin \beta}{2\omega}, \quad b = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha \left( \frac{1-R}{\lambda} \right)}{\operatorname{tg} \alpha \left( \frac{1-R}{\lambda} - 1 \right)}, \quad c = \frac{2(1-R)}{\left( \frac{1-R}{\lambda} - 1 \right) \sin 2\alpha}. \quad (6.18)$$

### 6.2.3. Математичне обґрунтування процесу сепарування на падді-машині

Незважаючи на широке застосування падді-машин для сепарування різних сипких продуктів, сьогодні відсутні інженерні методи технологічного розрахунку машин і не існує єдиної точки зору на фізичну суть процесу, що відбувається в падді-машині.

Розглянемо теоретичні передумови вибору параметрів падді-машини.

Вибір кута нахилу поверхні сортувального столу на прикладі суміші облущеного та нелущеного зерна вівса. Конструктивно сортувальний стіл машини складається з двох частин: поверхня верхнього сходу, яка нахилена під кутом  $\beta_e$  до горизонтальної площини (рис. 6.11), і поверхня нижнього сходу, орієнтована під кутом  $\beta_n$ .

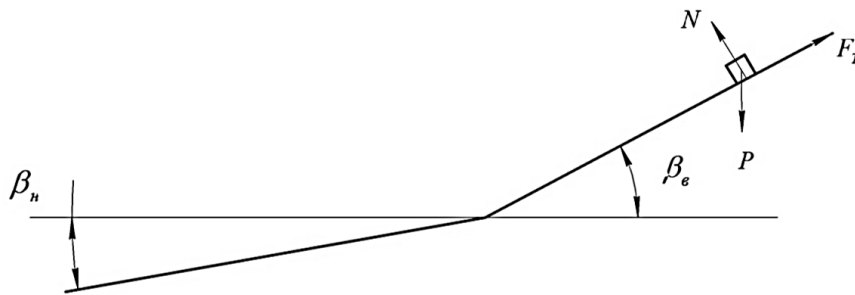


Рис. 6.11. Схема сил, що діють на зерно у вертикальній площині

Розглядаючи рівновагу нелущеного зерна на поверхні верхнього сходу, можна отримати:

$$F_T = P \sin \beta_e; \quad N = P \cos \beta_e, \quad (6.19)$$

де  $F_T$  – сила тертя;

$N$  – нормальна реакція;

$P$  – вага зерна.

Визначимо кут  $\beta_e$ , розглядаючи рух зерна по поверхні верхнього сходу. Нехай відносний рух зерна на етапі розбігу столу здійснюється з крайнього правого положення зерна в каналі (рис. 6.12), а стіл рухається в напрямку осі  $x$  за рівнянням:

$$x = -a \cos \omega t ,$$

де  $a$  – амплітуда коливань столу;

$\omega$  – циклічна частота водила.

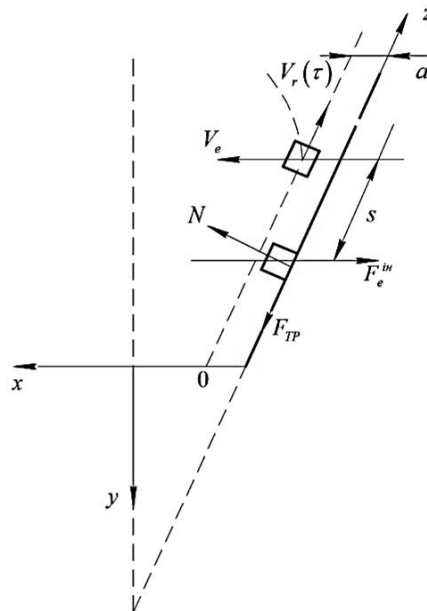


Рис. 6.12. Схема сил, що діють на зерно в площині столу

Очевидно швидкість столу визначається у такий спосіб:

$$\dot{x} = a\omega \sin \omega t;$$

$$\ddot{x} = a\omega^2 \cos \omega t + a\varepsilon \sin \omega t.$$

За час розбігу  $\tau$  стіл проходить відстань «а» і надає зерну переносну швидкість:  $V_e(\tau) = \dot{x}_{\max} = a\omega$ .

Для відносної швидкості вздовж ребра каналу маємо диференціальне рівняння:

$$m\ddot{z} = F_e^{ih} \sin \alpha - F_{TC} - F_{TB} - P \sin \alpha, \quad (6.20)$$

де  $F_e^{ih}$  – переносна сила інерції;  $F_e^{ih} = m\ddot{x}$  ;

$F_{TC}$  – сила тертя на поверхні столу;  $F_{TC} = f \cdot P \cos \beta$  ;

$F_{TB}$  – бокова сила тертя на поверхні ребра;  $F_{TB} = f \cdot F_e^{ih} \cos \alpha$  .

Таким чином, рівняння відносного руху має вигляд:

$$m\ddot{z} = F_e^{ih} (\sin \alpha - f \cos \alpha) - P(f \cos \beta + \sin \beta).$$

Звідки за нульової початкової швидкості

$$V_r = \frac{1}{m} (\sin \alpha - f \cos \alpha) \int_0^{\tau} F_e^{ih} dt - g(f \cos \beta + \sin \beta)\tau.$$

Обчисливши інтеграл, дійдемо до виразу:

$$\begin{aligned} V_r &= \frac{\sin \alpha - f \cos \alpha}{m} \cdot \frac{\tau}{3} \left[ F_e^{ih}(0) + 4F_e^{ih}\left(\frac{\tau}{2}\right) + F_e^{ih}(\tau) \right] - g(f \cos \beta + \sin \beta)\tau = \\ &= \frac{\tau}{3} (\sin \alpha - f \cos \alpha) \left[ \ddot{x}(0) + 4\ddot{x}\left(\frac{\tau}{2}\right) + \ddot{x}(\tau) \right] - g(f \cos \beta + \sin \beta)\tau. \end{aligned} \quad (6.21)$$

Приклад розрахунку проведемо за вихідними даними:

$$\alpha = 30^\circ; \quad \ddot{x}(0) = 20,4 \text{ м/с}^2;$$

$$\beta = 6,5^\circ; \quad x\left(\frac{\tau}{2}\right) = 10,1 \text{ м/с}^2;$$

$$f = 0,35; \quad x(\tau) = 0,$$

$$\tau = 0,18 \text{ с};$$

де  $\tau$  і  $x(\tau)$  – отримані в результаті чисельного інтегрування (Анурьев В.И., 1967), параметри  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $f$  взяті для діючого столу при сортуванні зерна вівса.

Скориставшись формулою (6.21), маємо, що

$$V_r = \frac{0,18}{3}(\sin 30^\circ - 0,35 \cos 30^\circ)[20,4 + 4 \cdot 10,1 + 0] - 0,18 \cdot 9,81(0,35 \cos 6,528^\circ + \sin 6,528^\circ) = -0,0965 \text{ м/с.}$$

Як показує розрахунок для нелущеного зерна, на поверхні верхнього сходу зерно не може рухатися догори у випадку, коли початкові швидкості зерна і каналу мають нульові значення. Вочевидь, що на етапі розбігу столу зерно не буде рухатись і вниз, перебуваючи в стані відносного спокою притиснутим до ребра каналу і рухаючись разом зі столом.

Така сама ситуація відтворюється на поверхні нижнього сходу за нульової початкової швидкості облущеного зерна.

На етапі гальмування столу диференціальні рівняння руху зерна, якому надана каналом максимально можлива швидкість в напрямку руху столу  $V_{\max} = \dot{x}_{\max} = a\omega(\tau)$ , мають вигляд:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -F_x^T; \\ m\ddot{y} &= -F_x^T + P \cos \beta, \end{aligned} \quad (6.22)$$

де  $F_x$  і  $F_y$  – проекції сили  $F_T$  на осі  $x$  та  $y$  (рис. 6.12).

Враховуючи формули (6.19), можна отримати, що

$$F_x = fmg \cos \beta \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}; \quad F_y = fmg \cos \beta \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}.$$



Тоді: 
$$m\ddot{x} = fmg \cos \beta \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}; \quad (6.23)$$

$$m\ddot{y} = mg \sin \beta - fmg \cos \beta \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}. \quad (6.24)$$

Наведені формули описують рух зерна на столі, але ними можна скористатись і для аналізу руху суміші за припущень, які надалі пропонуються до розрахункової схеми.

Як показують спостереження (рис. 6.13) періодичний поперечний рух столу з амплітудою «*a*» приводить до поперечного переміщення суміші, яка на кожному етапі гальмування столу почергово притискується до бокових стінок каналу (рис. 6.14), для кінцевого правого положення, (позиція «*-a*»).

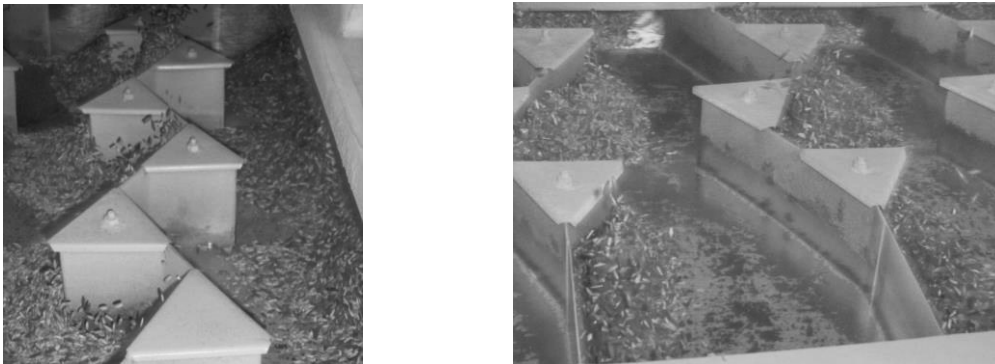


Рис. 6.13. Рух зерна в каналах падді-машини

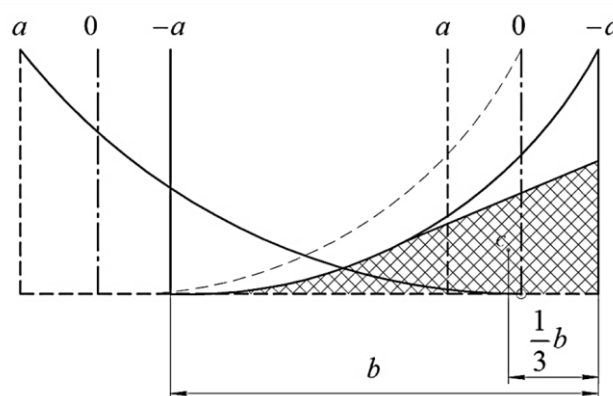


Рис. 6.14. Наближене зображення перерізу потоку суміші в каналі – крайнє праве положення

У разі таких поперечних коливань суміші більш легкі і крупні нелущені зерна будуть витискуватися з глибинних шарів суміші на поверхню (рис. 6.15), а в нижній частині перерізу потоку буде залишатися лущене зерно. Крім того, як показують спостереження, форма контактної підшви масиву суміші і поверхні стола в крайніх положеннях каналу практично незмінна. І в напрямку коливань має нульову швидкість в граничному лівому і правому положеннях.

На підставі наведених спостережень в першому наближенні будемо вважати площу перерізу потоку очищеного зерна сталою по довжині каналу. Переріз потоку будемо розглядати як переріз суцільного середовища, площа якого за поперечних коливань змінює свою форму і в граничних положеннях, у кінці гальмування столу, весь потік у поперечному напрямку має нульову швидкість. Будемо вважати, що в граничних положеннях площа поперечного перерізу очищеного потоку має трикутну форму (рис. 6.14, заштрихована), а центр ваги цієї площі в напрямку поперечному до напрямку сходу потоку здійснює коливання з амплітудою

$$a_c = \left( b + 2a - \frac{2}{3}b \right) \cdot \frac{1}{2} = \frac{b}{6} + a. \quad (6.25)$$

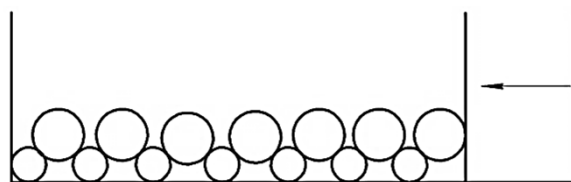


Рис. 6.15. Схема витискування нелущеного зерна

Приймаючи для поперечних коливань центра ваги перерізу потоку рівняння руху,

$$x = -a_c \cos \omega t. \quad (6.26)$$

Використовуючи диференціальне рівняння (6.24), отримаємо, що

$$\ddot{y} = g \sin \beta - fg \cos \beta \frac{\dot{y}}{\sqrt{(a_c \omega \cdot \sin \omega t)^2 + \dot{y}^2}}. \quad (6.27)$$

Диференціальне рівняння (6.27) описує рух потоку лушеного зерна, який протягом одного періоду коливань столу не є рівномірним і взагалі припиняється на етапах, на яких стіл разом з потоком зерна розганяється протягом часу  $t = \frac{\tau}{2}$ . Числовий розв'язок диференціального рівняння (6.27), результати якого представлені на рис. 6.14, дає можливість визначити швидкість потоку зерна при сході зі столу, а також середню його швидкість і її залежність від таких параметрів сортування, як кут нахилу столу та його кутова швидкість. При сортуванні зерна вівса для кута нахилу столу  $\beta_n = 1,528^\circ$  отримана середня швидкість сходу лушеного зерна  $V = 0,0066$  м/с.

За мінімальної ширини каналу  $b = 21$  см площа перерізу потоку в одному каналі приймається:

$$S_k = \frac{1}{2}bh = \frac{1}{2} \cdot 21 \cdot 0,35 = 36,75 \text{ см}^2.$$

Загальна площа:  $S = S_k \cdot k = 36,75 \cdot 24 = 882 \text{ см}^2$ .

Продуктивність машини:

$$Q = S \cdot V \cdot \gamma = 882 \cdot 0,599 \cdot 0,5 = 264,16 \frac{\text{г}}{\text{с}} = 950,97 \text{ кг/год.}$$

Розрахунковий графік швидкості сходу лушеного зерна при гальмуванні сортувального столу наведено на рис. 6.16.

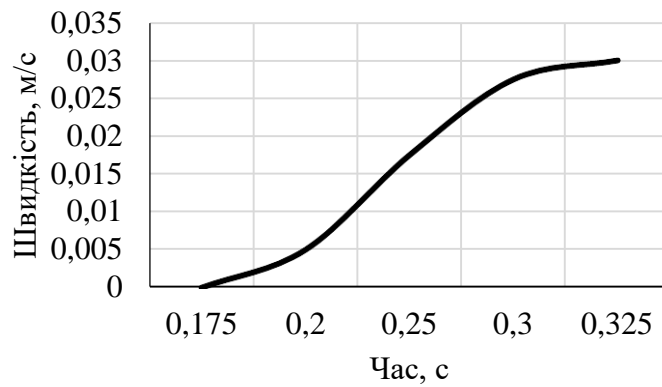


Рис. 6.16. Графік залежності швидкості сходу лушеного зерна при гальмуванні столу

#### 6.2.4. Визначення параметрів, що впливають на процес, та розробка параметричної схеми

Процес сепарування, або відокремлення, на підприємствах зі зберігання та переробки зерна має вельми важливе значення. Розділення зернових мас та проміжних продуктів відбувається на сепараційних машинах різного типу, у тому числі й на падді-машинах.

Умови сепарування визначаються великою кількістю факторів: фізичними властивостями та концентрацією окремих компонентів суміші, що розділяється, параметрами робочих органів, технологічною схемою та принципом дії сепаруючої машини, в даному випадку падді-машини, метою відокремлення, продуктивністю та інше. Структурна схема процесу відокремлення нескладна, не потребує спеціального зображення, а параметрична схема наведена на рис. 6.17.

До вихідних параметрів можна віднести навантаження на робочий канал  $q$ , характеристику окремих частин або їх сукупностей продукту, що розділяється  $k_q$ , їх концентрацію  $k_k$ , характеристики робочих органів (розміри, форма робочих каналів)  $k_{p.o.}$ , початкову швидкість руху частинки  $v_{ч.}$ , амплітуду коливань робочого органа  $A$ , частоту коливань  $\omega$ , кута розходження стінок робочого ка-

нала  $\alpha$ , положення робочого органа в просторі (кута нахилу до горизонталі)  $\beta$ , коефіцієнт зміни величини стирання робочої поверхні деталей  $k_3$ .

На процес віброударного сепарування також можуть впливати параметри навколишнього середовища, особливості технологічної схеми тощо, але ми їх не братимемо до уваги. Вихідні параметри можуть визначатися ефективністю сепарування  $E_c$ , а також економічними показниками  $E_{ек}$  (Адлер Ю.П., Марков Е.В., 1971).

Існуюча теорія сепарування не враховує всіх перелічених факторів. Тому основними теоретичними положеннями можна користуватися для отримання оптимальних рішень в окремих випадках, а також як первинною інформацією про процес відокремлення при його оптимізації.

Крім того, існуючі теорії відокремлення сипких матеріалів потребують експериментального визначення деяких характеристик у рівняннях зв'язку між параметрами процесу.

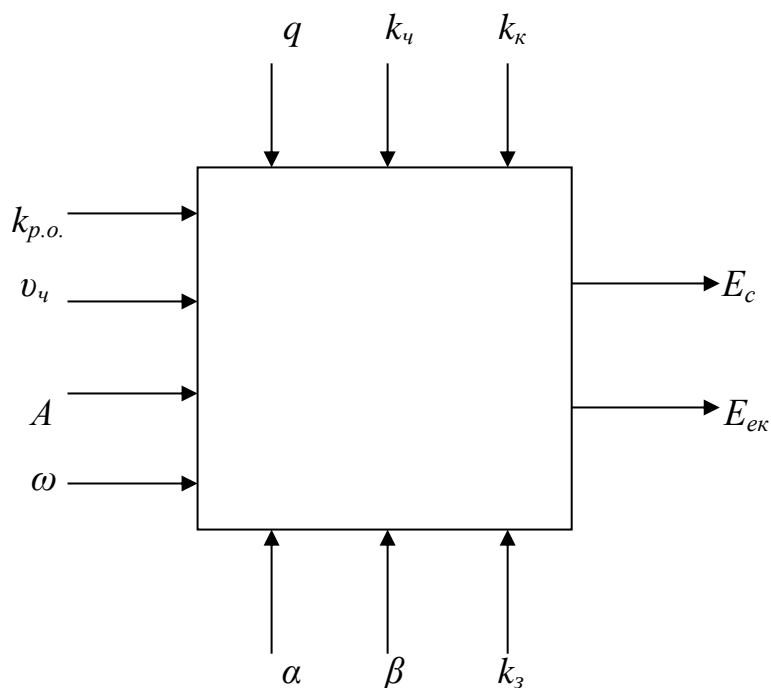


Рис. 6.17. Параметрична схема процесу віброударного сепарування

### 6.2.5. Розробка функціональної схеми процесу віброударного сепарування

Оскільки в процесі дослідження процесу віброударного сепарування була розроблена параметрична схема (рис. 6.17), що враховувала велику кількість змінних факторів (вхідних параметрів), то в подальшій роботі й розрахунках були прийняті допущення, за яких деякі параметри (навантаження на канал  $q$ ; фізико-механічна характеристика частин продукту, що сепарується  $k_q$ ; концентрація продукту  $k_k$ ; характеристика робочих органів машини  $k_{p.o.}$ ; початкова швидкість продукту) в загальному випадку можна було прийняти стабільними, без змін, тобто середніми характеристиками для певної культури (вівса) та самої машини. Постійним можуть бути кут розходження стінок робочого каналу  $\alpha = 90^\circ$ , амплітуда коливань сортувального столу  $A$ , та відстань між стінками зигзагоподібних каналів  $l$ . Виходячи з умов експлуатації та характеристики зносу робочої поверхні деталей можливо визначити відсоток коефіцієнта зносу  $k_z$  за певний часовий період.

Припустимо, що в технологічному об'єкті (машині), умовно зображеному у вигляді прямокутника, відбуваються зміни характеристик потоку продукту (рис. 6.18).

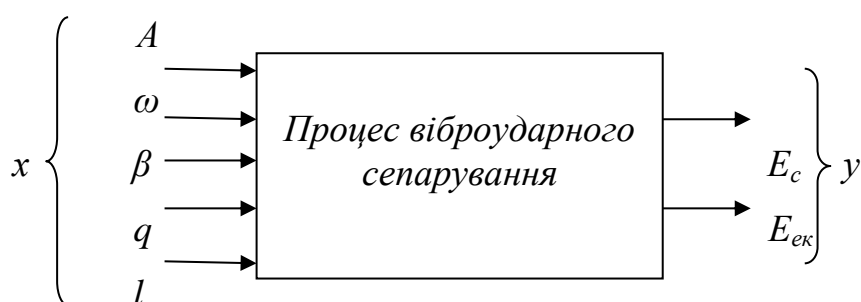


Рис 6.18. Умовне зображення технологічного процесу сепарування в падді-машині (віброударного сепарування)

Зміни в технологічному процесі здійснюються за допомогою одного з факторів, що впливають, яким може бути один з вхідних параметрів. За незмінних

умов проведення процесу в машині величина вихідної характеристики буде залежати тільки від зміни вхідної величини. Для спрощення вважатимемо, що потік володіє однією характеристикою на вході  $x$  та однією на виході  $y$ .

Розглянувши параметричну схему та провівши аналітично взаємозв'язок параметрів вхідних, параметрів керування та різноманітних перешкод на вихід параметрів  $E_c$  (ефективність процесу сепарування) та  $E_{ек}$  (економічна ефективність процесу), загальний взаємозв'язок може бути виражений системою рівнянь:

$$\begin{cases} E_c = f(\omega, A, k_{p.o.}, v_q, q, k_q, k_k, \alpha, \beta, k_3, l) \\ E_{ек} = f(\omega, A, k_{p.o.}, v_q, q, k_q, k_k, \alpha, \beta, k_3, l) \end{cases} \quad (6.28)$$

У загальному вигляді система рівнянь являє собою параметричну модель процесу сепарування.

Аналізом та шляхом проведення експериментальних досліджень визначено більш значущі параметри на процес віброударного сепарування та їх взаємозв'язок з динамікою руху робочого столу.

### **6.3. Методика експериментальних досліджень**

#### **6.3.1. Установка падді-машини та методика проведення досліджень**

Експериментальні дослідження, з метою вибору більш оптимальних технологічних та режимних параметрів роботи падді-машини, проводили в лабораторії кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції Дніпровського державного аграрно-економічного університету на спеціально виготовленій установці (рис. 6.19).

Для виконання експерименту використовували суміш облущених та не-лущених зерен вівса вологістю 12,5–14 % з умістом смітних домішок (вівсюга) до 5 % та кількістю пилу 0,23 % від загальної маси. Якість вихідного продукту

визначали згідно з ГОСТ 12770–73. Проби відбирали по ГОСТ 13586.3.–83 «Метод відбору проб».

Лабораторна установка включала такі основні вузли (рис. 6.19): робочий орган; виконавчий механізм; привід; станину; допоміжні пристрої.

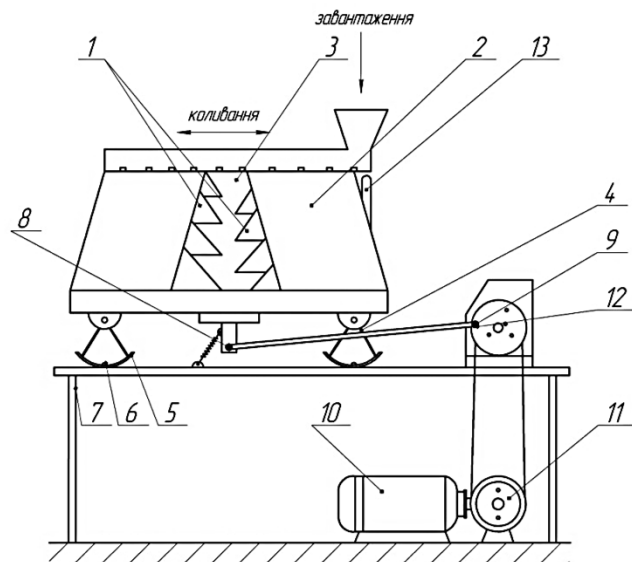


Рис. 6.19. Експериментальна установка падді-машини

Робочий орган – це похилий стіл 1 зі стінками 2, що утворюють зигзагоподібний канал 3. Стіл 1 кріпиться шарнірно до стійки 4, котрий для забезпечення коливального руху має сегментно-подібний елемент 5, що насаджений на стопорний болт 6, який виключає переміщення стояків 4 відносно станини 7. Привідний механізм складається з кронштейна 8, один кінець якого закріплений на корпусі 1, а інший з'єднаний з кривошипно-шатунним механізмом 9. Рух від електродвигуна передається через редуктор 11 клинопасову передачу 10, кривошипно-шатунному механізму з болтом 12 для регулювання амплітуди зворотно-поступального руху стола 1. Кут нахилу стола змінюється за допомогою пристосування 13, а також пристрою для зміни ширини зигзагоподібного каналу.

Експериментальна установка розпочинає роботу з надходження в живильник зигзагоподібного каналу 3 суміші луцених та нелуцених зерен вівса.



Вмикається електродвигун 10. У результаті зворотно-поступальних коливань, поперечних руху зерна, виконується сортування: лущені зерна видаляються нижнім сходом, нелущені – верхнім.

Методика проведення експериментальних досліджень полягала в завантаженні насіння вівса після луцення в робочий елемент сортувального столу та сепарування лущених та нелущених зерен.

Методика передбачає зміну:

- ступеня подачі сировини на сепарування, тобто продуктивність завантаження робочого каналу сортувального столу (від 0,6 до 1,8 кг/хв.);
- кута нахилу сортувального столу від 2 до 7 градусів;
- частоти коливань сортувального столу від 45 до 55 коливань на хвилину;
- амплітуди коливань сортувального столу від 180 до 220 мм;
- ширини зигзагоподібного каналу від 200 до 220 мм.

За вихідний зразок (рис. 6.20) було взято суміш лущеного зерна вівса з 25 %-вим вмістом нелущеного. Вологість матеріалу була визначена стандартним методом за ГОСТ 13586.5–85 і становила 12 %.



Рис. 6.20. Вихідний зразок матеріалу:

1 – нелущені зерна; 2 – лущені зерна; 3 – вівсюг

Методика проведення експерименту передбачала оцінку результатів сепарування: відбирали середню пробу лущених зерен масою 500 г і методом розбору проб на розбірній дошці визначали якість відокремлених лущених зерен (наявність в них нелущених зерен). У такий спосіб на розбірній дошці визначали якість нелущених зерен (тобто наявність в них лущених зерен). Результати записували та вираховували у відсотковому співвідношенні.

Для визначення продуктивності кожного каналу було розроблено спеціальний лоток, в який засипали нижній сход (лущене зерно) протягом хвилини.

### **6.3.2. Методика вимірювання досліджуваних величин, прилади та обладнання**

У дослідженнях змінювали кут нахилу сортувального столу, котрий визначали спеціально виготовленим кутоміром, а положення сортувального столу фіксували болтом та гайкою, затисненими в пазу кутоміра.

Частоту коливань сортувального столу регулювали зі застосуванням редуктора та клинопасової передачі кінематичної схеми приводу;

Амплітуду коливань – шляхом зміни довжини тяги кривошипно-шатунного механізму; ступінь завантаження сировини (продуктивність завантаження) – шляхом відкривання та закривання щілинного дозатора знизу живильного пристрою; амплітуду коливань – положенням точки під'єднання шатуна до кривошипно-шатунного механізму; частоту коливань сортувального столу – за допомогою частотного перетворювача; відстань між стінками робочого каналу – шляхом пересуванням однієї зі стінок каналу; круповідокремлююча машина має забезпечувати підвищені концентрації лущених зерен у першому продукті та концентрації нелущених зерен у другому порівняно з вихідним продуктом.

Якщо позначити концентрацію лущених зерен у вихідному продукті  $K$ , в першому  $K_1$ , а в другому  $K_2$ , то повинно бути  $K_1 > K$ , а  $K_2 < K$ . Відповідно концентрацію нелущених зерен запишемо в такий спосіб:  $H_1 < H < H_2$ , тобто в другому продукті вона реєструється вищою (Кулагин М.С. та ін., 1979).

Для оцінки технологічної ефективності необхідно передусім визначити кількість виділеного ядра в першому продукті за формулою

$$K_{\text{кіль}} = \frac{K_1 A}{K} \quad (6.29)$$

де  $K_1$  – концентрація лущених зерен у першому продукті, кг;

$A$  – кількість першого продукту, кг;

$K$  – кількість лущеного зерна у вихідному продукті, кг.

Однак у першому продукті можуть бути виділені практично всі лущені зерна, що надійшли до машини, але серед них багато нелущених. Це значно знижує технологічну ефективність круповідокремлення. Тому технологічну ефективність круповідокремлення необхідно доповнити якісним показником процесу. Таким показником прийнято відношення фактичного підвищення концентрації лущених зерен у першому продукті, порівняно з вихідним, до максимально можливого підвищення концентрації.

Максимальна концентрація лущених зерен у першому продукті дорівнює одиниці, фактична  $K_1$ , максимально можливе підвищення концентрації ядра буде  $1 - K$ , а фактичне підвищення  $K_1 - K$ .

Якісну ефективність круповідокремлення можна виразити відношенням (Лубников Л.П. та ін., 2002):

$$E_{\text{якісне}} = \frac{K_1 - K}{1 - K} \quad (6.30)$$

Загальну технологічну ефективність представлено рівнянням:

$$E = E_{\text{кільк}} \cdot E_{\text{якісне}} = \frac{K_1 \cdot A}{K} \cdot \frac{K_1 - K}{1 - K} \quad (6.31)$$

Величину  $A$  можна виразити через значення концентрацій ядра в усіх продуктах на основі матеріального балансу:

$$K = AK_1 + (1 - A)K_2. \quad (6.32)$$

Звідси

$$A = \frac{K - K_2}{K_1 - K}. \quad (6.33)$$

Відповідно

$$E = \frac{K_1}{K} \cdot \frac{K - K_2}{K_1 - K} \cdot \frac{K_1 - K}{1 - K}. \quad (6.34)$$

Отже, маємо кінцеву формулу для визначення ефективності процесу круповідокремлення.

### 6.3.3. Вибір факторів варіювання

На процес круповідокремлення впливають певні фактори. Серед них спостерігаються частота коливань сортувального столу  $\omega$ ; кут нахилу сортувального столу  $\beta$ ; навантаження на канал  $q$ ; амплітуда коливань сортувального столу  $A$ ; відстань між зигзагоподібними стінками робочого каналу  $l$  та початкова забрудненість матеріалу.

Для вибору більш впливових факторів скористалися методом статистичного аналізу, тобто графічним методом, який вважається досить надійним та ефективним знаряддям сучасної науки, надійно ввійшов до методики наукових досліджень.

Статистичні графіки використовують з метою узагальнення статистичних даних та їх аналізу. Суть методу: для кожного з параметрів побудовано лінійні графіки за мінімальним та максимальним значеннями функції відгуку, а потім за допомогою програмних засобів, розрахували швидкість зміни функції при зміні фактор  $\frac{df}{dx}$ . Найбільша швидкість зміни функції свідчить про ступінь впливу на результат процесу.

Для побудови графіків використано табличний редактор Microsoft Excel; для частоти коливань отримані графіки (рис. 6.21), в результаті підрахунків (табл. 6.2) – певні значення кута нахилу прямих, який має найменше значення  $2,3^\circ$  і найбільше  $4^\circ$ .

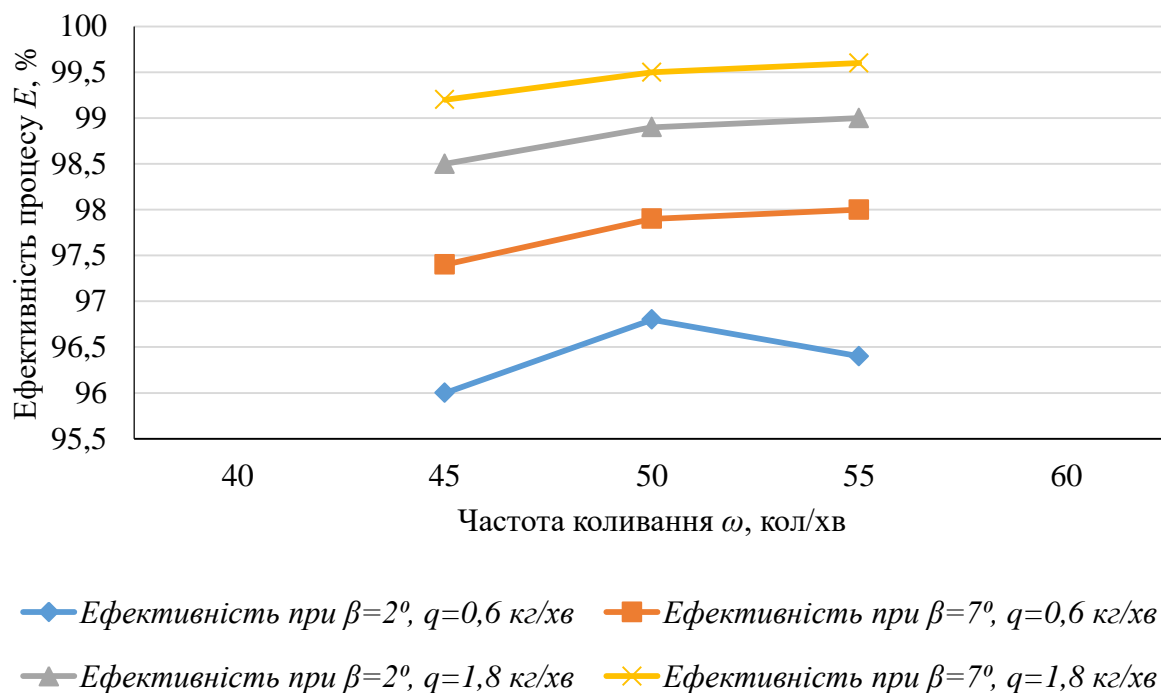


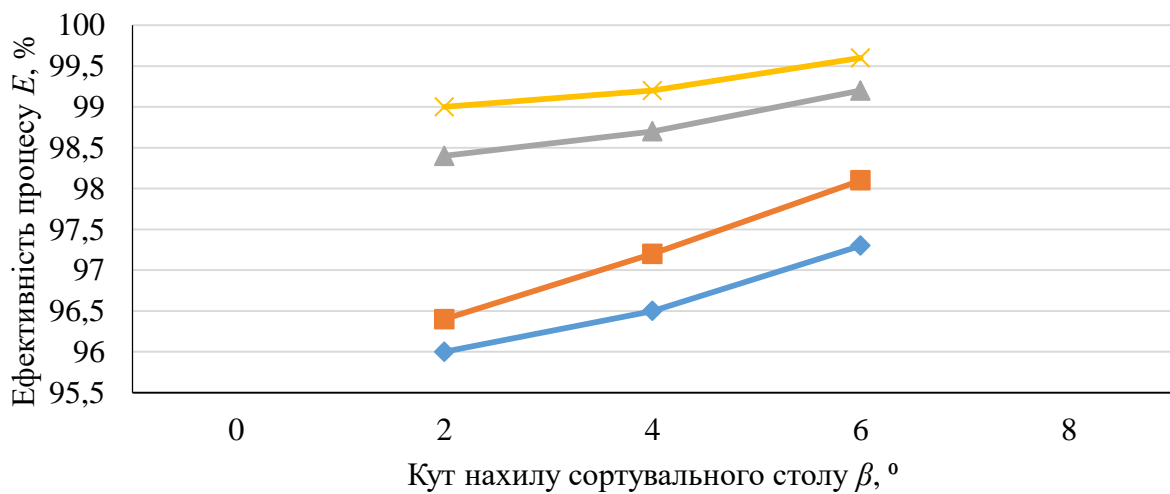
Рис. 6.21. Графік залежності зміни ефективності сепарування від частоти коливання сортувального столу

Що стосується кута нахилу сортувального столу, то отримані наступні графіки – рис. 6.22, в результаті підрахунків – табл. 6.3 значення кута нахилу прямих, він має найменше значення  $6,8^\circ$  і найбільше  $17,7^\circ$ .

Що стосується навантаження на канал сортувального столу то нами були отримані наступні графіки (рис. 6.23), в результаті підрахунків (табл. 6.4) були отримані наступні значення кута нахилу прямих, він має найменше значення  $53,0^\circ$  і найбільше  $65,1^\circ$ .

Таблиця 6.2. Вплив частоти коливань  $\omega$  на ефективність процесу круповідокремлення  $E$

Значення фактора		$E, \%$		$\frac{df}{dx}$	$\alpha, ^\circ$
min	max	min	max		
45	55	96,0	96,4	0,04	2,3
		97,3	98,0	0,07	4,0
		98,5	99,0	0,05	2,9
		99,2	99,6	0,04	2,3



—◆— Ефективність при  $\omega=45\text{мм}, q=0,6\text{кг/хв}$  —■— Ефективність при  $\omega=55\text{мм}, q=0,6\text{кг/хв}$   
 —▲— Ефективність при  $\omega=45\text{мм}, q=1,8\text{кг/хв}$  —×— Ефективність при  $\omega=55\text{мм}, q=1,8\text{кг/хв}$

Рис. 6.22. Графік залежності зміни ефективності сепарування від кута нахилу сортувального столу

Таблиця 6.3. Вплив кута нахилу сортувального столу  $\beta$  на ефективність процесу круповідокремлення  $E$

Значення фактора		$E, \%$		$\frac{df}{dx}$	$\alpha, ^\circ$
min	max	min	max		
2	7	96,0	97,3	0,26	14,5
		96,4	98,0	0,32	17,7
		98,5	99,2	0,14	7,7
		99,0	99,6	0,12	6,8

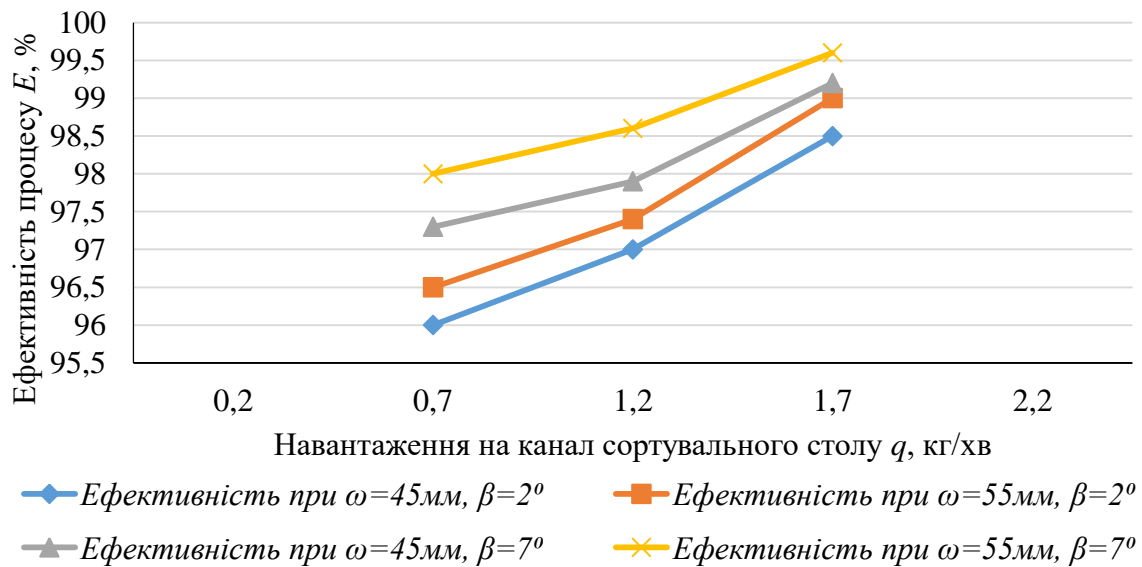


Рис. 6.23. Графік залежності зміни ефективності сепарування від навантаження на канал сортувального столу

Для амплітуди коливань була використана та сама методика і отримано наступні графіки (рис. 6.24), в результаті підрахунків (табл. 6.5) були отримані наступні значення кута нахилу прямих, він має найменше значення  $1,5^\circ$  і найбільше  $1,8^\circ$ .

При визначенні впливу ширини робочого каналу на ефективність процесу ми скористалися тією ж методикою і отримали наступні графіки (рис. 6.25), в результаті підрахунків (табл. 6.6) були отримані наступні значення кута нахилу прямих, він має найменше значення  $1,6^\circ$  і найбільше  $2,1^\circ$ .

Таблиця 6.4. Вплив величини навантаження на канал  $q$  сортувального столу на ефективність процесу круповідокремлення  $E$

Значення фактора		$E$ , %		$\frac{df}{dx}$	$\alpha$ , °
min	max	min	max		
0,6	1,8	96,0	98,5	2,083	64,3
		96,4	99,0	2,166	65,1
		97,3	99,2	1,583	57,6
		98,0	99,6	1,333	53,0

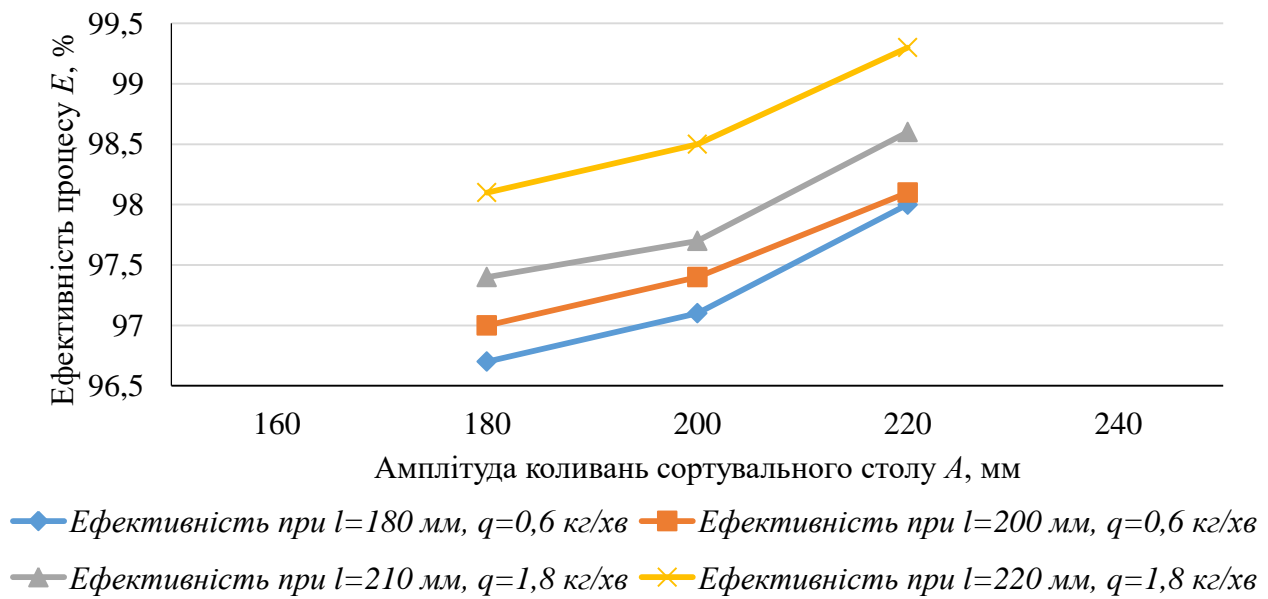


Рис. 6.24. Графік залежності зміни ефективності сепарування від амплітуди коливань сортувального столу

Математичний аналіз дозволив зробити висновок: найбільш впливовими параметрами на процес сепарування сумішей є кут нахилу  $\beta$ , ступінь завантаження робочого каналу  $q$  та частота коливань сортувального столу  $\omega$ .

Таблиця 6.5. Вплив величини амплітуди коливань  $A$  сортувального столу на ефективність процесу круповідокремлення  $E$

Значення фактора		E, %		$\frac{df}{dx}$	$\alpha, ^\circ$
min	max	min	max		
180	220	96,7	98,0	0,033	1,8
		97,0	98,1	0,027	1,5
		97,4	98,6	0,030	1,7
		98,1	99,2	0,027	1,5



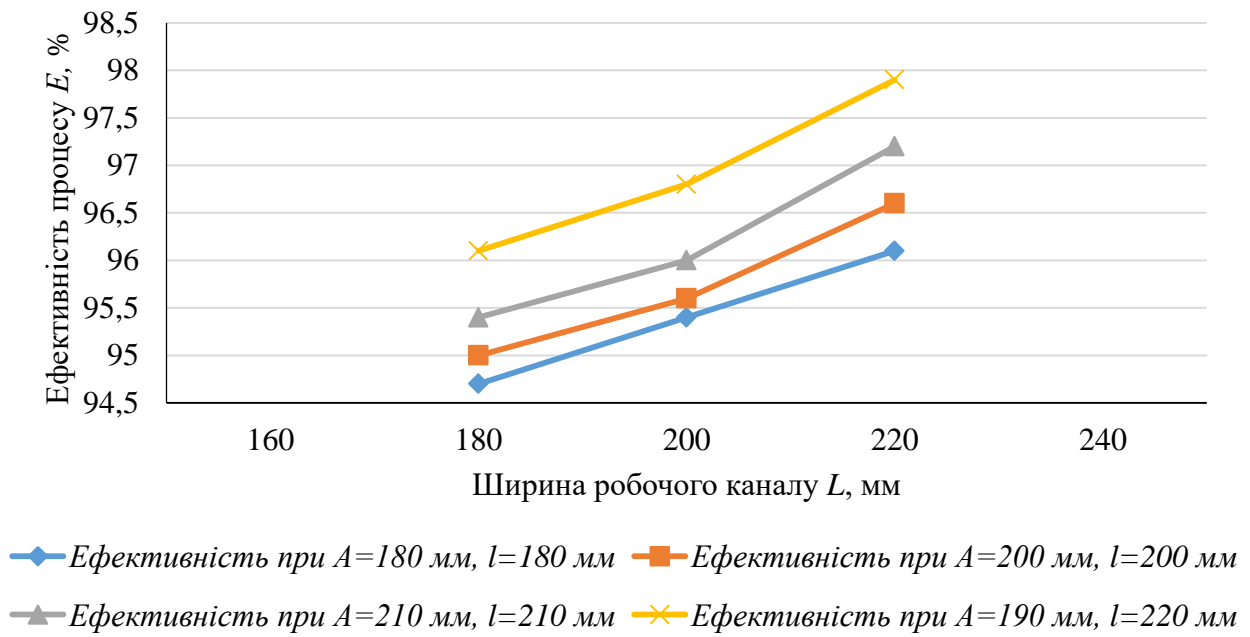


Рис. 6.25. Графік залежності зміни ефективності сепарування від ширини робочого каналу сортувального столу

Отже, в подальшому при плануванні експерименту будемо використовувати ці фактори.

Таблиця 6.6. Вплив ширини робочого каналу  $l$  сортувального столу на ефективність процесу круповідокремлення  $E$

Значення фактора		E, %		$\frac{df}{dx}$	$\alpha, ^\circ$
min	max	min	max		
180	230	94,7	96,1	0,028	1,6
		95,0	96,6	0,032	1,8
		95,4	97,2	0,036	2,1
		96,1	97,9	0,036	2,1

## **6.4. Результати експериментальних досліджень сепарування продуктів лушення зерна вівса та їх обговорення**

### **6.4.1. Процес завантаження та розподілу сировини живильником**

У ході проведення експериментальних досліджень враховували, що в лабораторній установці застосовували елементи конструкції удосконаленого живильника, в якому досягали рівномірний розподіл вівса перед сепаруванням.

Однак в реальних умовах експерименту виявили, що у випадку завантаження з бункера в живильник вівса з більшою продуктивністю відбувається «згущення» або надмірне заповнення живильника сировиною, овес не встигає просипатися на робочу поверхню сепарувального столу, відбувається надлишкове заповнення комірок та гальмування крупи шляхом створення в прямокутних вікнах щільних зон.

Швидкість розшарування суміші з живильника по сепарувальній площині змінюється залежно від основних параметрів роботи машини: частоти, амплітуди коливань, відстані між робочими зигзагоподібними стінками, продуктивністю та інтенсивністю заповнення живильника сировиною, динамічною зрівноваженістю сепарувального сита, тобто нерівномірністю зворотно-поступальних рухів, особливо в кінцевих точках гальмування та розгону.

Результатами досліджень встановлено, що, за постійно збільшуваного навантаження від 0,3 до 2,5 кг/хв, завантаження зерен вівса після лушення, зерна спочатку розподіляються в початковій частині комірок від місця завантаження, а потім переміщуються на сепаруючу поверхню. Це можна спостерігати з відеограми спостережень (від центра розподілу сировини з бункера кожна секція робочого сортувального каналу має три вивантажувальних, регульованих по величині спеціальною заслінкою вікна). Зі збільшенням продуктивності завантаження постійно збільшується «навантаження», тобто кількість зерна в комірці, на перші комірочки та знижується до останньої комірочки. Спостерігається нерівномірність завантаження, як видно на графіку при продуктивності 0,3 кг/хв (рис. 6.26, крива 5). Зерно розподіляється тільки в перших трьох комірках, при-

чому більша його кількість знаходиться саме в 1-й комірці, від місця завантаження бункера. Зерно з 1, 2 та 3-ї комірок висипається на сортувальний стіл, вступає в процес сепарування, тобто на лущені та нелущені зерна. Із підвищенням продуктивності завантаження криві 4, 3, 2 та 1 (рис. 6.26) комірки 1, 2, 3 переповнюються, а комірки від 3 до 12 збільшують кількість пропущеного зерна на сепарувальну поверхню. Однак нерівномірність, аналізуючи графік, зберігається.

Аналіз результатів показав, що у випадку підвищення продуктивності завантаження зерна на лабораторну установку від 0,3 до 2,3 кг/хв. У перші моменти рівномірне завантаження відсутнє, оскільки зерна встигають проходити через комірки на сортувальний стіл, не розподіляються по всій його ширині, а тому ступінь сепарування зерна на лущені та нелущені невисокий. Аналогічна ситуація спостерігається і при зміні вологості зерна від 19%-вої до 12,5%-вої. За нижчої вологості завантаженого через живильник продукту його розподіл по каналу живильника від завантажувального бункера з комірками під дією вібрацій здійснюється рівномірно і практично всі комірки мають достатнє заповнення (крива 1, рис. 6.27). Зі підвищенням вологості більш вологе зерно має більш високий коефіцієнт тертя, що у свою чергу викликає (крива 2, рис. 6.27) нерівномірність розподілу зерна у вивантажувальних комірках.

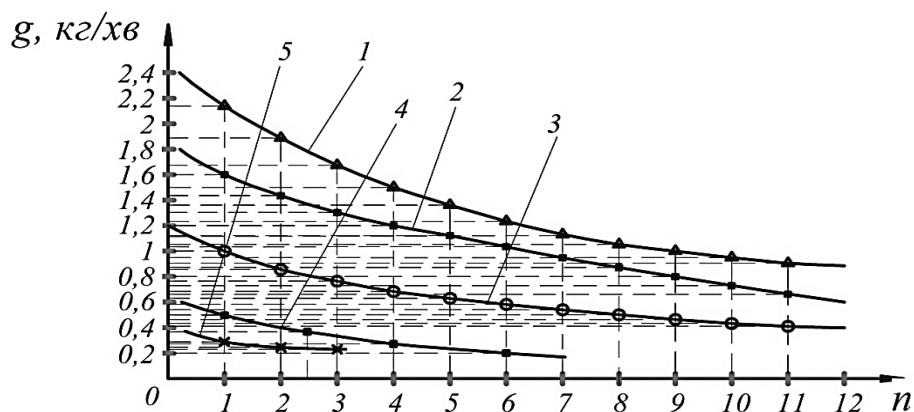


Рис. 6.26. Графік заповнення комірок живильника від 1 до 12 ( $n$ ) залежно від продуктивності завантаження  $q$

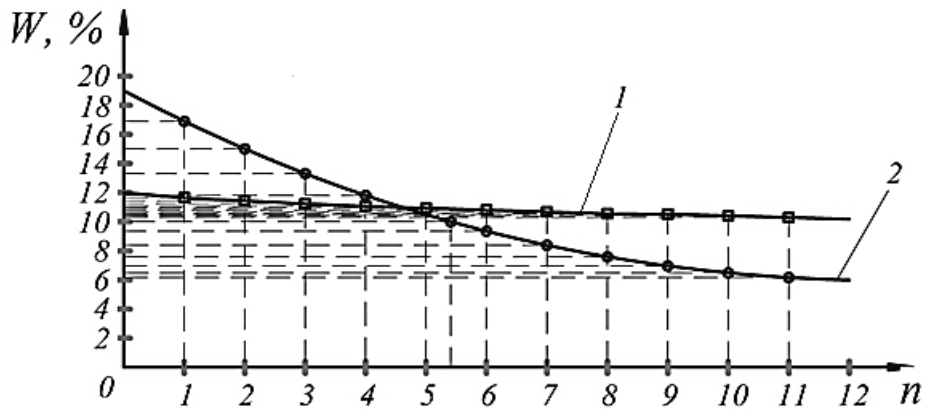


Рис. 6.27. Графік розподілу зерна лущеного вівса в залежності від його вологості

Підвищення продуктивності завантаження сприяє заповненню комірок, змінює характер розподілу зерен по поверхні сортувального столу, тобто формується рівномірний потік на сортувальну поверхню за рахунок коливань столу, виконується рівномірне розподілення зерен по поверхні їх сортування на лущені та нелущені «вспливанням» на поверхню, як більш легких нелущених, та «осіданням» на сортувальний стіл облущених, як більш важких. Спочатку зерно висипається на стіл щільним потоком. Далі, за рахунок частоти вібрації, амплітуди коливань та кута нахилу столу, починається розгалуження цього потоку і рух лущених та нелущених зерен відносно одне одного, тобто в точці початку сепарування.

Характер розподілу зерна, що висипається з живильника через комірку, свідчить про нерівномірність його розподілу. В перший момент попадання зерна на стіл відбувається накопичення зерна на відстані, близькій до точки його висипання. В подальшому відбувається зменшення кількості зерна на одиницю площі та рівномірне його розподілення по довжині та ширині робочого каналу стола (рис. 6.28). Для кривої 1 в точці С спостерігається висипання великої кількості зерна з комірки, оскільки вона розташована ближче до бункера, з якого вивантажується зерно. Відповідно точки  $C_1$  та  $C_2$  знаходяться на кривих 2 та 3,

мають меншу кількість (за масою 6 гр.) зерна, що вивантажується в цих точках, оскільки вивантажувальні комірки знаходяться на більшій відстані від вивантажувального бункера. У такий спосіб в одному робочому каналі столу, на якому розташовані три розподільні комірки живильника, спостерігається нерівномірність завантаження.

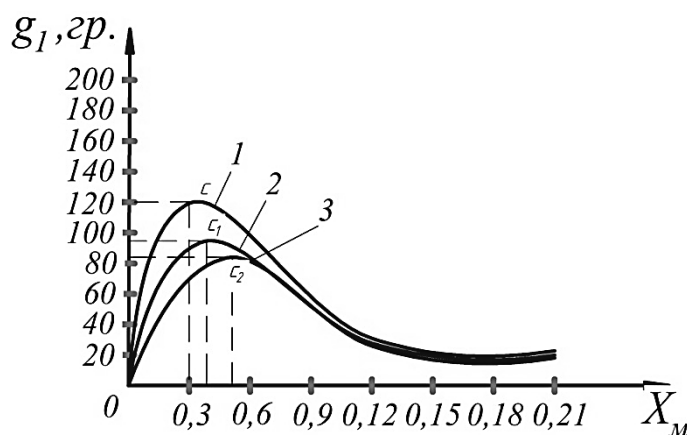


Рис. 6.28. Графік розподілу зерна на робочому столі при вивантаженні з комірок живильника

Однак у процесі вібрацій робочого столу та формування коливального руху зерна, з-за зворотно-поступальних коливань, шар вирівнюється, розподіляється по всій ширині каналу і втягується в коливальний рух, в якому починає відбуватися розшарування лущеного та нелущеного зерна.

Ефективність видалення лущеного вівса зі загального потоку зернової маси представлена на рис. 6.29.

Зі збільшення кута нахилу робочого каналу установки швидкість сходу зерен лущеного вівса підвищується, тобто вслід за тим, що здійснюється розшарування по робочій поверхні каналу, лущене зерно починає рухатися, без коливальних рухів, униз. Швидкість його руху підвищується шляхом відбивання від стінок зигзагоподібних перегородок та під час удару, кут переміщення зерна у зв'язку з нахилом поверхні каналу збільшується і траєкторія руху лущеного зерна змінює положення. Таким чином, результуючий шлях, який здій-

снює елементарна частинка (луцене зерно), переміщується поступально донизу.

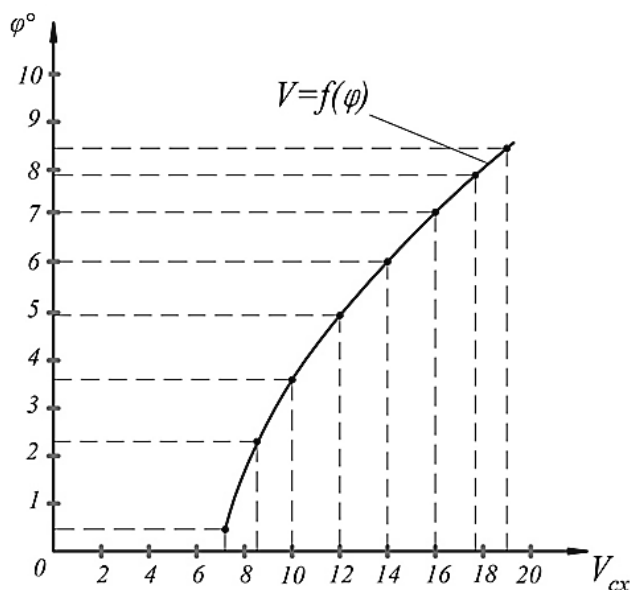


Рис. 6.29. Графік зміни швидкості сходу  $V_{cx}$  зерен луценого вівса по робочому каналу сортувального столу

При порушенні рівномірності руху робочої поверхні сортувального столу, тобто зміни точки зворотного ходу столу, що є порушенням динамічних характеристик, різко погіршується процес рівномірного зворотно-поступального руху зерен. У кінцевій точці в цьому випадку відбувається так званий удар, шар зерна різко переміщується до однієї зі зигзагоподібних стінок в бік якої рухався стіл, потім від удару шар зерна підкидається вгору і під дією зворотного руху переміщується до протилежної стінки.

Далі подібне явище повторюється і на протилежній зигзагоподібній стінці. Шар зерна отримується нерівномірним, у ньому з-за різких ударних діянь в «мертвих» кінцевих точках зворотно-поступального руху, не формується направлений шар зерна вгору та вниз по сортувальному шару, а існує хаотичний рух, «підпригування» луцених і нелуцених зерен вівса. Зведені до «0» ударних явищ у кінцевих точках зворотно-поступального руху столу, навпаки, формує

рівномірний шар зерна, що рухається в поперечному горизонтальному напрямку, зліва направо, з якого рівномірно розпочинають виділятися ті групи зерен, що рухаються вгору – нелущені, та вниз – лущені.

Таким чином, формується рівномірний сортувальний шар, швидкість розшарування зерен на якому може регулюватися крім амплітуди і частоти коливань, кутом нахилу сортувального столу.

#### 6.4.2. Вплив амплітуди та частоти коливань на процес сепарування вівса

У процесі проведення експериментальних досліджень визначали вплив амплітуди та частоти коливань сортувального столу на ефективність процесу сепарування. Дослідження проводили в діапазоні амплітуд від 140 до 240 мм, а частота коливань дорівнювала від 40 до 60 коливань на хвилину.

Отримані дані свідчать про те, що коефіцієнт ефективності сепарування при амплітуді коливань 140 мм має значення 0,68–0,69 (рис. 6.30). У міру збільшення амплітуди підвищується і ефективність сепарування. Найбільше її значення досягається при амплітуді від 180 до 200 мм.

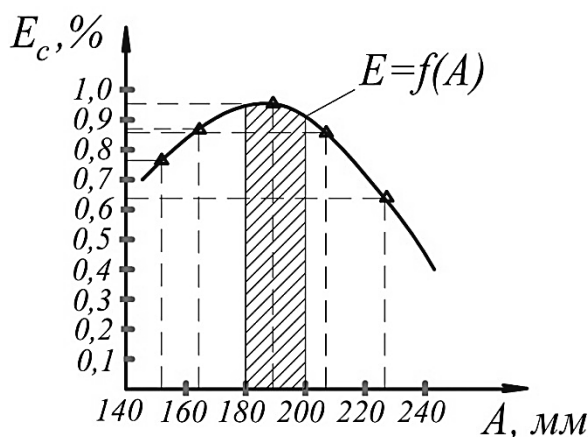


Рис. 6.30. Графік зміни ефективності сепарування залежно від амплітуди коливань

Далі зі збільшенням амплітуди помітно знижується ефективність сепарування. Поводження зерен у робочому каналі при цьому неоднакове. При значенні амплітуди коливань від 140 до 170 мм шар зерна коливається в робочому каналі недостатньо розосереджено, тобто переміщується купою, щільним шаром (ділянка  $AB$ ), розосередженою залишається тільки кінцева частина шару зерна (ділянка  $BC$ ) – рис. 6.31.

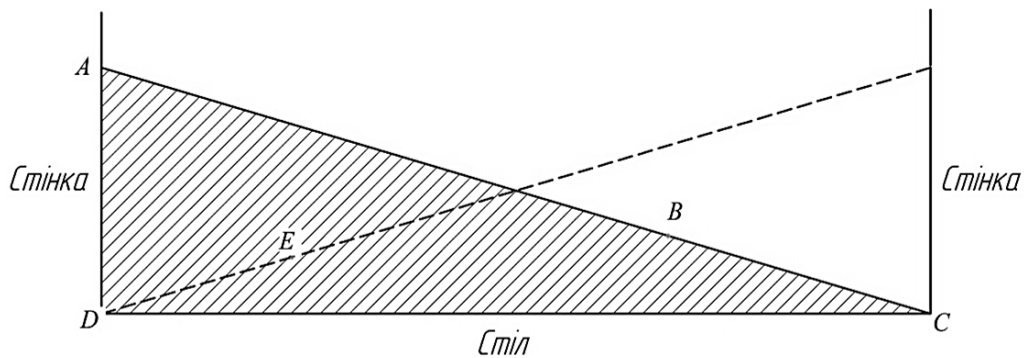


Рис. 6.31. Схема розподілу зерна при сортуванні

На ділянці  $BC$  відбувається стабільне розшарування зерна тонким шаром, в якому лущені та нелущені зерна вівса порівняно легко набувають направлено-го руху, вниз–вверх, залежно від їх форми, чистоти поверхні, питомої ваги, вологості, зерна орієнтуються на відокремлення. На ділянці  $AB$  діють сили тиску шару, сили натиску до стінки  $AO$ , сили взаємодії між зерном, які не дозволяють лущеним та нелущеним зернам прийняти напрямок руху. Аналогічне відбувається й при переході робочого каналу в протилежному напрямку переміщення до стінки  $DC$ ; у цьому випадку сепарування краще спостерігається, навпаки, на ділянці  $OE$ , де трикутник шару зерна нанесений пунктирною лінією (ділянка  $ODC$ ).

Зі збільшенням амплітуди коливань висота шару ( $AB$  та  $BC$ ) зменшується, а ділянки гарантованого розшарування зерна збільшуються ( $OE$  та  $BC$ ), що підвищує ефективність сепарування. Збільшення амплітуди коливань до 240 мм від величини амплітуди в 200 мм відбувається зниження амплітуди



сепарування. У такому випадку частинки зерна за більшої амплітуди набувають прискорення, що направлене перпендикулярно робочому столу, тобто до стінок. У них переважає перпендикулярне переміщення по столу, а складова сила, яка орієнтує зерно вверх–вниз, зменшується, чим можна пояснити зниження ефективності сепарування.

Проаналізований також взаємозв'язок амплітуди та частоти коливань робочого столу на ефективність сепарування. За змінної амплітуди коливань 140–180 мм та їх частоти 40 коливань на хвилину ефективність сепарування невисока; разом з тим зі збільшенням частоти коливань від 40 до 55–60 коливань на хвилину, ефективність сепарування збільшується. В результаті експериментів встановлені найбільш раціональні для процесу сепарування вівса значення величини амплітуди коливань та частоти, коли процес сепарування зерен стабілізується (рис. 6.32).

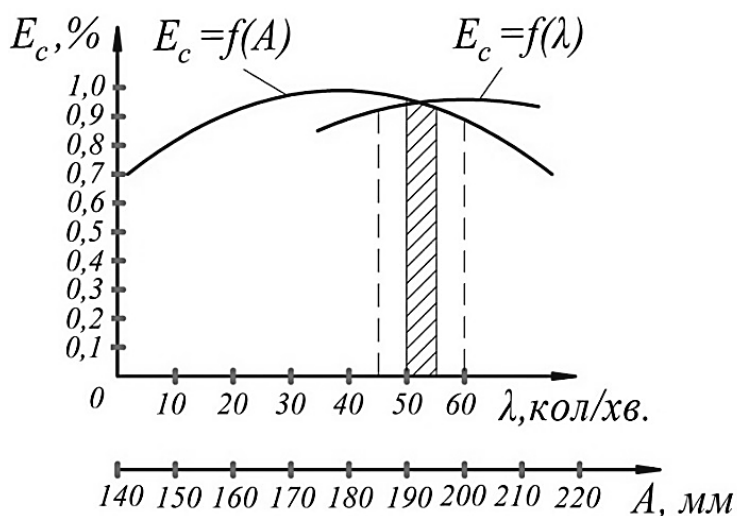


Рис. 6.32. Взаємозв'язок амплітуди  $A$  та частоти  $\lambda$  коливань на ефективність сепарування

Для частоти коливань це відповідає 50–55 коливань на хвилину, а для амплітуди більш доцільно використати значення 185–195 мм.

### 6.4.3. Характеристика процесу сепарування

Для розділення суміші вівса після луцення на лущені та нелущені зерна, тобто на дві фракції, кут встановлення сорбуючої поверхні регулюється спеціальним пристроєм, і діапазон регулювань коливається від 0 до 10°. На елементарну частинку (зернину), як і на весь шар, впливають кут нахилу робочого столу, ширина робочого каналу, кут встановлення робочих зигзагоподібних стінок, амплітуда та частота коливань столу, вологість вихідної сировини, що потрапляє на сортувальний стіл, продуктивність його подачі через вікна живильника, динаміка роботи столу. Ці фактори визначають в цілому, як буде здійснюватися процес сепарування на вібраційній поверхні робочого каналу. В результаті зворотно-поступальних коливань робочого каналу зигзагоподібні стінки, залежності від кута нахилу сепаруючої поверхні по-різному відбивають більш легкі за масою нелущені зерна, змінюючи їх швидкість переміщення вгору по похилій поверхні. Лущені зерна, як більш важкі та мають менший коефіцієнт тертя, зі загальної суміші переміщуються в нижній шар на робочу поверхню та «сповзають» униз до вихідного патрубку лущених зерен.

На рис. 6.33 (крива  $E_c=f(\varphi)$ ) видно, що при горизонтальному розташуванні сортувальної поверхні робочого столу ефективність сепарування близька до коефіцієнта 0,1, тобто практично спостерігаються невисока продуктивність і незначна ефективність розділення лущених та нелущених зерен.

Зі збільшенням кута нахилу швидкість сепарування підвищується, що підвищує продуктивність та поліпшує ефективність сепарування, максимальне значення якої досягається при куті нахилу робочої сепарувальної поверхні 6,5 – 7,5° (заштриховано на графіку).

Під час обговорення взаємозв'язку кута нахилу робочого столу та частоти коливань на ефективність сепарування виявлено, що за незначних кутах нахилу (0 – 1,5°) та від 10 до 40 коливань столу на хвилину ефективність сепарування характеризується як незначна та не перевищує коефіцієнт 0,3 – 0,35. Збільшення частоти до 50 – 55 коливань на хвилину зі збільшенням кута нахилу сприяє

більш високій продуктивності та кращій якості розділення суміші на лущені та нелущені зерна вівса.

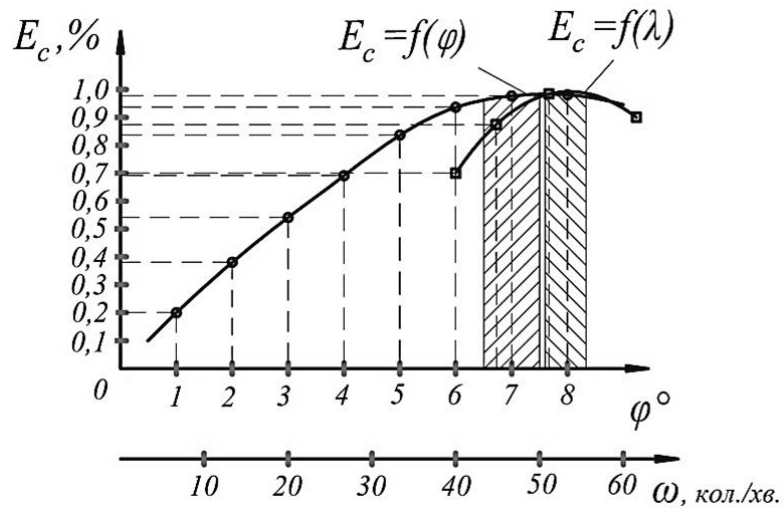


Рис. 6.33. Графік зміни ефективності сепарування  $E_c$  від кута нахилу робочого столу  $\varphi$  та частоти коливань  $\omega$

Найбільш вагомими для раціональних режимів роботи та високої ефективності розділення суміші можна вважати кут нахилу робочого столу  $6,5 - 7,5^\circ$ , а частоту  $52 - 55$  коливань на хвилину (рис. 6.33).

#### 6.4.4. Вплив динамічної нерівномірності коливань робочого столу на процес сепарування

У задачу експериментальних досліджень входило вивчення характеру зношування поверхні, по якій прокочуються фіксуєчі колеса. Моделювання зношування опорної поверхні рами реєстрували шляхом стиску закріплених на рамній конструкції пластин товщиною  $0,1$  мм кожна.

На кожній зі сторін рами під кожним з чотирьох коліс була можливість збільшення зазору, моделюючого зношування, до  $1$  мм.

Під час налаштування установки на стабільний режим роботи були відрегульовані опорні колеса та опорна рама по якій переміщувався робочий канал. Коливання відбувалися з налаштованою частотою та амплітудою в установлен-

ному режимі. Характер розподілу зерна при сепаруванні і у зигзагоподібних стінок і по ширині каналу за обраних параметрів також був стабільним.

При «зношуванні» на кожній з чотирьох опорних поверхонь в 0,1 мм принципово характер переміщень робочого столу практично не змінюється, система продовжує працювати в стійкому режимі. Збільшення «зношування» до 0,2 мм викликає появу деякої нестійкості в роботі системи, з'являється додатковий шум при зворотно-поступальних рухах робочого столу, однак помітного погіршення процесу сепарування вівса в робочому каналі не спостерігається. Зі збільшенням зазору до 0,3 мм погіршується процес сепарування зерен вівса, збільшується кількість зерен, що не виділяються зі суміші, та, потрапивши в лущені зерна, технічно з'являються додаткові коливання, що характеризують нерівномірну роботу робочого каналу столу.

Для наочності процес зношування та поява наклепу на поверхнях фіксуючих та опорних коліс представлено на рис. 6.34.

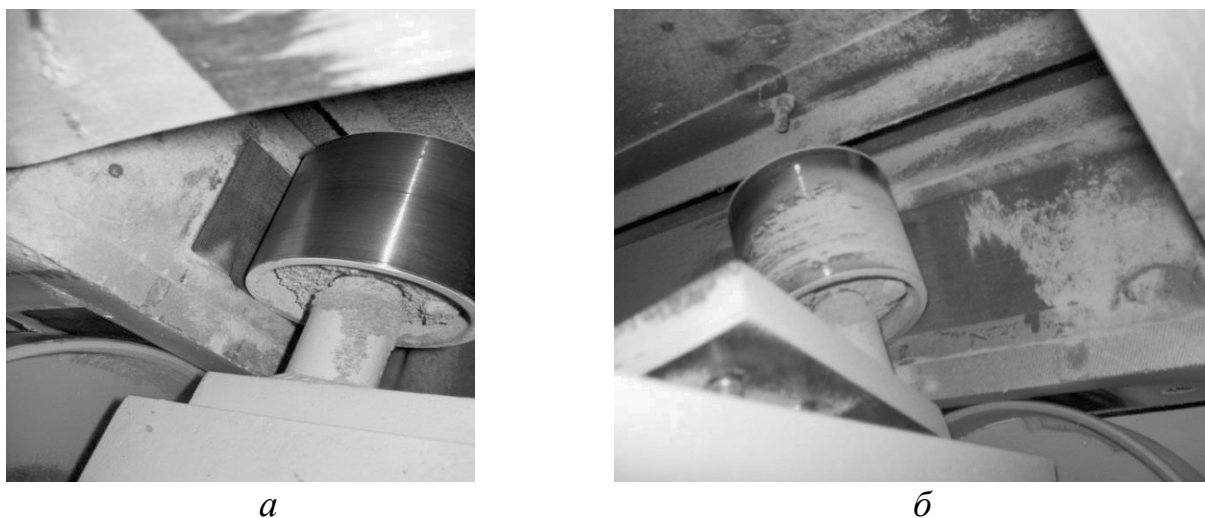


Рис. 6.34. Зовнішній вид ролика до (а) і після (б) експерименту

Характерний вид зносу підтверджує нерівномірні навантаження на опорні колеса в процесі роботи падді-машини.

Експериментальні дані свідчать про зниження ефективності сепарування, яке розпочинається при зношуванні контактних поверхонь на 0,25 мм. За пода-

льшого збільшення зношування опорних поверхонь, погіршення процесу сепарування підвищується більш інтенсивно (рис. 6.35).

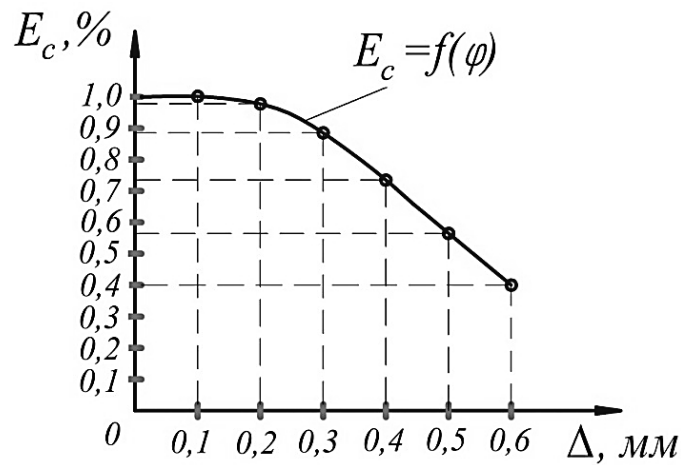


Рис. 6.35. Графік впливу ступеня зношування опорної поверхні на ефективність процесу сепарування

Різко погіршуються також експлуатаційні характеристики установки, підвищується шум, з'являється биття рами та робочого столу, виникає проковзування коліс, а головне – порушується рівномірний, якісний процес сепарування суміші вівса на луцені та нелуцені зерна. Звідси можна зробити висновок, що зношування опорних поверхонь робочого столу не може перевищувати більш ніж 0,25 мм.

## 6.5. Висновки

1. Аналіз технологій, процесів, обладнання і його робочих органів в галузі виробництва круп показав, що на даний час відсутні конструктивні параметри машин, які забезпечують стійку роботу всіх елементів, що приймають участь в процесі. Наведено теоретичне узагальнення в удосконаленні живильника для завантаження сортувального столу машини віброударної дії, обґрунтуванні раціональних конструктивних, технологічних параметрів і динамічних

характеристик при розділенні потоку круп'яної сировини, що забезпечують стабільне і якісне сепарування.

2. На підставі запропонованої моделі руху зерна у робочій зоні сортувального столу, вивчення закономірностей і взаємозв'язків між технологічними особливостями руху потоку зерна від завантаження у живильнику до виходу з сортувального столу у вихідні патрубки лущеного та не лущеного вівса, розроблена параметрична схема процесу, теоретичний огляд взаємозалежностей основних вихідних параметрів процесу –  $E_c$  – ефективність сепарування та  $E_e$  – його економічної ефективності, запропонована математична модель процесу, формалізовано у вигляді функціональних рівнянь, рішення якої дозволяє чисельно визначити раціональні технологічні параметри процесу сепарування.

3. Вперше теоретично розглянуто динаміка руху робочого столу машини віброударної дії по сортуванню вівсяної крупи, на основі досліджень виявлено основні точки навантаження: опорні колеса робочого столу; бокові направляючі колеса; торцеві колеса ексцентрикового механізму. Знайдені диференціальні рівняння руху робочих елементів столу з урахуванням складного руху технологічного потоку крупи перед сортуванням, та їх взаємодія, що дає можливість погодити роботу сортувального столу при сепаруванні потоку вівсяної крупи.

4. Експериментально визначені закономірності розподілу зерен вівса живильником в сортувальному зигзагоподібному каналі, умови розшарування лущеного та нелущеного зерна та руху їх потоків в протилежні сторони. Встановлено, що кут нахилу столу до горизонту повинен бути в межах 6,5 – 7,5 градусів, кількість вібрацій 50 – 52 за хвилину, амплітуда коливань 190 мм, при яких ефективність сепарування досягає значення  $E_c = 97\%$ .

5. Комплексним аналізом результатів теоретичних та експериментальних досліджень, проведенням багатостороннього експерименту рекомендовані значення конструктивних параметрів основних вузлів машини при значенні коефіцієнта сортування  $K_c = 0,92 – 0,97$ , що дає змогу отримувати крупу вищого гатунку з вмістом не лущених ядер до 0,1 %.

6. Результатом дослідження схеми сил що діють на сортувальний стіл сепарувальної машини, на фіксуюче та несучі колеса, підшипник, є диференціальні рівняння плоско паралельного руху сепаруючої поверхні та диференціальне рівняння руху елементів падді-машини під час гальмування столу при зворотно-поступальному русі. На їх основі розроблена програма чисельного інтегрування диференціальних рівнянь руху столу з котрих слідує, що найбільші значення кутова швидкість приймає на початку розбігу столу та в кінці гальмування, де відповідає синхронній частоті обертання. Встановлено, що зношування опорних поверхонь не може перевищувати величину 0,25 мм.

## **Розділ 7. НАУКОВІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ КОМПЛЕКСНОЇ ПЕРЕРОБКИ НАСІННЯ ПРОМИСЛОВИХ КОНОПЕЛЬ**

У сучасних умовах помітно підвищується інтерес виробників та споживачів до конопляної продукції, особливо з насіння промислових конопель. Це вимагає глибоких науково-практичних знань та прискорених дій в області системних досліджень щодо комплексної переробки насіння для одержання функціональних і спеціальних харчових продуктів, біодобавок та препаратів (Oseyko M. et al., 2019; 2021).

### **7.1. Особливості щодо вітчизняних сортів конопель та технологій їх вирощування**

Науковцями різних поколінь науково обґрунтовані технологічні аспекти вирощування луб'яних культур: оптимальні дози та співвідношення мінеральних добрив для різних типів ґрунтів, строки та способи сівби, глибина загортання насіння, типові схеми сівозмін та інше.

На підставі результатів досліджень, проведених П. А. Голобородьком, К. Я. Коротею з питань удосконалення технологій вирощування луб'яних культур, розроблено ресурсозберігаючі технології вирощування конопель і льонувдовгунця, а також комплексну систему захисту цих культур від шкідників, хвороб та бур'янів. В Інституті луб'яних культур Національної академії аграрних наук України (ІЛК НААН) закладено і підтримується унікальний багаторічний дослід беззмінного вирощування конопель ще із 30-х років минулого століття – часів заснування інституту. Відомі дослідники конопляної галузі В. Ф. Фанстіль, Д. Ф. Ткаченко, М. Г. Городній, І. І. Реп'ях, О. С. Нечипоренко, К. Я. Коротя всебічно вивчали вплив норм внесення органічних і мінеральних добрив та їх співвідношень на продуктивність конопель, а також баланс азоту, фосфору, калію й гумусу в ґрунті (<http://ibc-uaas.at.ua>).

Коноплі – культура, яка характеризується швидким пристосуванням до



різних умов вирощування. Це культура короткого світлового дня. Нижня межа ефективності температури  $+5^{\circ}\text{C}$ . Насіння конопель проростає при температурі від  $+1-2$  до  $+45^{\circ}\text{C}$ . Проростки витримують знижені температури в межах від  $-3$  до  $+5^{\circ}\text{C}$  протягом 12–15 діб, а від  $-5$  до  $-10^{\circ}\text{C}$  – протягом 5 діб.

У конопель існує два періоди стиглості: технічна та біологічна. Період технічної стиглості конопель характеризується завершенням приросту рослин у висоту, накопиченням урожаю соломи та волокна, формуванням високих якісних властивостей волокнистої продукції. Біологічна стиглість конопель – це повне дозрівання насіння. Термін між технічною та біологічною стиглістю в конопель становить від 25 до 35 діб.

З урахуванням біологічних особливостей культури конопель та напрямів використання існує декілька способів збирання цієї культури.

Збирання врожаю тільки на волокно відбувається у фазу технічної стиглості. Врожай лише на насіння збирають у фазу біологічної стиглості конопель зернозбиральними комбайнами без збирання лубоволокнистої частини рослини. Збирання врожаю на двобічне використання (стебло і насіння) проводять також у період біологічної стиглості конопель (Пилипченко А. В. та ін., 2016).

Одним із найефективніших інструментів інтенсифікації коноплярства є правильно підібраний сорт. За рахунок сорту можна досягти підвищення врожайності на 20–30 % і більше.

Індійські коноплі та препарати з них, внаслідок наркотичних властивостей, підлягали державному та міжнародному контролю на основі конвенції про наркотичні засоби 1925 року та Міжнародної конвенції 1936 року стосовно боротьби з нелегальною торгівлею сильнодіючими засобами. СРСР погодився з рекомендаціями ООН про призупинення вживання препаратів індійських конопель, і з 1954 року вони були виключені з державної фармакопеї та зняті з виробництва (Канабець В. та ін., 2012).

Ще в 70-х роках минулого століття в ІЛК НААН почалися селекційні роботи з виведення, так званих, безнаркотичних конопель. Незабаром знані учені-селекціонери заявили про створення сортів, у яких вміст тетрагідроканабінолу

(ТГК) був дуже мізерним. Сьогодні вони стверджують, що саме завдяки українським розробкам галузь коноплярства, раніше заборонена в більшості країн Європи у зв'язку з наркоманією, була реабілітована і розвивається стрімкими темпами (в Німеччині з 1997 р. побудовано понад 30 коноплезаводів). Українські ботаніки пішли далі та вивели сорти конопель, які взагалі не містять ТГК. Ці сорти почали висівати в 2007 році у двох господарствах: ІЛК НААН та фірмі “Агро-Ханф” (<http://www.ar25.org>).

Одним із найважливіших напрямів діяльності ІЛК НААН було створення однодомних конопель замість дводомних. У дводомних плоскінь дозріває раніше від матірки. У зв'язку з цим плоскінь доводиться вибирати з посіву вручну, що вимагає значних затрат праці, а матірку збирають окремо механізованим способом (на насіння). Рослини однодомних конопель дозрівають одночасно, забезпечуючи одноразове механізоване збирання врожаю на насіння й волокно. Ініціатором створення однодомних конопель був М. Гришко, який на основі генетичних досліджень разом із колегами вперше вивів сорт конопель, у якого плоскінь та матірка дозрівають одночасно (<http://esu.com.ua>).

Відомо, що наркотичні речовини конопель містяться у смолоподібній масі – гашиш-вмісній суміші різних канабіноїдів, яка утворюється в суцвіттях. Наркотична активність конопель визначається наявністю канабіноїдних сполук, основними з яких є канабідіол (КБД), ТГК та його ізомери, канабінол (КБН). Найбільш висока токсичність характерна для ТГК та його ізомерів. Канадські дослідники виділяють 426 компонентів канабіноїдів, з яких 62 являють собою різні видозміни ТГК. Усі вони близькі між собою і належать до однієї групи природних фенолів (Канабець В. та ін., 2012).

М. Д. Мигаль та І. Л. Шульга (2014) дослідили динаміку накопичення канабіноїдів у вегетативних та генеративних органах конопель і за допомогою методу тонкошарової хроматографії встановили, що в оболонці та зародку насіння конопель канабіноїди відсутні.

Багатьма дослідниками підтверджено, що накопичення канабіноїдів у рослинах конопель визначається генетичними та еколого-географічними чинни-

ками (температура, сонячна радіація, вологість тощо). Проте більшості авторів так і не вдалося виявити певну залежність між абіотичними (хімічними, фізичними) складовими та канабіноїдами. Вирішальними факторами, які визначають вміст канабіноїдів, є сортові ознаки.

Науковці ІЛК НААН виявили відсутність зв'язку між господарськими ознаками та вмістом канабіноїдів, спромоглися створити сорти (ЮСО-14, ЮСО-16 та Дніпровські одностомні б) без наркотичних властивостей з паралельним вивченням особливостей успадкування канабіноїдів. Їм вдалося провести гібридизацію і встановити, що високий вміст канабіноїдів є домінантною ознакою, яка передається по материнській лінії.

Завдяки залученню нового селекційного матеріалу, а також застосуванню нових удосконалених методів підвищення продуктивності, поліпшення ознаки одностомності за найбільш продуктивним статевим типом, на не менш жорсткому фоні збереження стійкості до пошкодження шкідниками і хворобами, було створено цілий ряд високопродуктивних сортів.

Досягнення ІЛК НААН поступово стали надбанням світу шляхом обміну інформацією на міжнародних симпозиумах у Німеччині, Швейцарії, Канаді, Литві, взаємообміну науковими доробками (Угорщина, Польща, Румунія, Німеччина, Китай, Франція) та надання наукових консультацій селекціонерам Італії, Канади, Австралії та Китаю (Канабець В. та ін., 2012).

За результатами міжнародних випробувань сорти ІЛК НААН виявилися порівняно високоврожайними щодо волокна та насіння, відзначилися скоростиглістю, а за низьким умістом ТГК були унікальними. Так, сорти ЮСО-14 та ЮСО-31 зареєстровано в країнах Євросоюзу; ЮСО-14, ЮСО-31, Золотоніські 11 та Золотоніські 15 – у Канаді. ІЛК НААН з 2003 року плідно співпрацює з французькою федерацією виробників конопель, яка розповсюджує елітне насіння в Європі, Америці, Австралії та Канаді.

Термін “промислові” застосовують для означення однорічних конопель, що використовують для одержання волокна і насіння та містять у листках і суцвіттях ТГК не більше встановлених законодавством норм (для України

< 0,08 %). Промислові коноплі – цінна технічна культура, джерело натуральної сировини, яку, завдяки своїм високим споживчим властивостям, широко використовують у харчовій, будівельній, автомобільній, біоенергетичній, текстильній, целюлозно-паперовій та інших галузях виробництва (Маринченко І. О. та ін., 2018). Луб'яні волокна мають високу міцність, низький електричний опір, природну бактерицидність та гігієнічність, а тканини з них є антистатичними, гігієнічними, поглинають до 30 % вологи та 95 % ультрафіолетових променів (<https://uk.wikipedia.org>).

Сучасні сорти конопель здатні формувати врожай соломи, волокна і насіння в межах 60–120, 17–25 і 6–12 ц/га, відповідно. Вміст ТГК у рослинних пробах цих сортів коливається від тисячних частин до повної відсутності.

2011 року занесені до Реєстру нові сорти конопель Вікторія, Гляна та Ніка, в яких уміст ТГК дорівнює 0 (Канабець В. та ін., 2012).

Селекцію промислових конопель також досліджують учені товариства з обмеженою відповідальністю “Інститут органічного землеробства” (до 04.09.2017 р. ТОВ “Науково-дослідний інститут сої”) агропромислової групи “Арніка”. Сучасні сорти конопель, які поширені в Україні, наведено в табл. 7.1.

## **7.2. Особливості складу насіння промислових конопель**

Насіння конопель являє собою однонасінний плід – горішок округлояйцеподібної форми, який складається із зовнішньої твердої рогової оболонки та розташованого всередині насінини ядра, оточеного тонкою плівкою темно-зеленого забарвлення (рис. 7.1). Насінина має дві сім'ядолі, корінець і бруньку, які зрослися між собою і є одним цілим – зародком. Основна частка поживних речовин насіння конопель зосереджена в зародку. Насіння конопель містить більше 30 % олії і близько 25 % білка, а також значну кількість мінеральних речовин, дефіцитних грубих харчових волокон (целюлоза, геміцелюлоза, пектин, лігнін) та біологічно активних речовин (фосфоліпіди, жирні кислоти, вітаміни). До складу насіння головним чином входить білок едестін, а також азотовмісні речовини – нуклеїн, холін та незначна кількість тригонелліна. Крім того, в на-

сінні конопель знайдено 37 хімічних елементів, із яких домінують кальцій, магній, фосфор, калій, сірка, а також невелика кількість заліза та цинку. Додатково виявлено в насінні конопель рідкоземельні елементи: торій, селен, молібден, цирконій та берилій (Shewry P. R. et al., 2000; Юфрякова К. М. та ін., 2020).

Таблиця 7.1. Сорти посівних конопель, які занесені до Державного реєстру сортів рослин, придатних для поширення в Україні на 2021 рік (Примаков О. А., 2013)

Сорт конопель	Заявник*	Рік реєстрації	Вміст ТГК, %	Напрями використання	Урожай насіння, ц/га
ЮСО-31	1	1987	0,05	Волокнистий і насіннєвий	9,2–10,8
Гляна	1	2007	0,00	Універсальний	12,0–15,0
Глесія	1	2016	0,00	Насіннєвий	20,0–22,0
Глухівські 51	1	2017	0,00	Технічний	9,0–10,5
Глоба	2	2018	<0,08	Технічний	5,6
Лара	2	2018	<0,08	Технічний	5,3
Мрія	3	2019	<0,08	Універсальний	**
Сула	2	2019	<0,08	Технічний	5,2
Миколайчик	1	2019	<0,08	Технічний	14,0–16,0
Глухівські 85	1	2019	<0,08	Технічний	8,0–9,0
Артеміда	1	2020	<0,08	Технічний, олійний	**
Гармонія	1	2021	<0,08	Універсальний	**
Вік 2020	1	2021	<0,08	Універсальний	**

*Примітка.* \* 1 – ІЛК НААН; 2 – ТОВ “Інститут органічного землеробства”; 3 – ТОВ “АВЕКОНА”, ФГ “Кравець О. П.”;

\*\* – дані відсутні.



Рис. 7.1. Насіння конопель

Порівняння показників складу та якості насіння конопель із різних регіонів світу представлено в табл. 7.2.

Таблиця 7.2. Характеристика складу та якості насіння конопель

Показник	Регіон виробництва насіння конопель			
	Пакистан (Anwar F. et al., 2006)	Канада (Vonapartis E. et al., 2015)	Україна (Oseyko M. et al., 2019)	США (Lan Y. et al., 2019)
Вміст:				
олії, %	26,9–31,5	26,9–30,6	33,3±0,5	24,3–28,1
лінолевої кислоти, % <sup>a</sup>	56,5–60,5	59,7	54,8–56,9	-
α-ліноленової кислоти, % <sup>a</sup>	16,9–20,0	17,0	16,0–18,5	-
протеїну, %	23,0–26,5	23,8–28,0	22,5±0,15	32,7–35,9
клітковини, %	17,0–20,5	-	32,3±0,2	-

*Примітка.* <sup>a</sup> – від загальної кількості жирних кислот.

Як видно із табл. 7.2:

– вміст олії в насінні конопель найбільший з регіону України (33,3 %), а найменший – з регіону США (24,3–28,1 %);

– вміст протеїну найбільший у насінні з регіону США (32,7–35,9 %), а найменший – з регіону України (22,5 %);

– вміст клітковини найбільший з регіону України (32,3 %), а найменший – з регіону Пакистану (17,0–20,5 %).

Вміст золи в насінні конопель із різних регіонів коливається від 5 до 7,6 % (Anwar F. et al., 2006; Vonapartis E. et al., 2015; Lan Y. et al., 2019).

Як видно із даних табл. 7.3 і 7.4, найбільший вміст фосфору виявлено в насінні з регіону України, а найменший – з регіону США. Що стосується феруму і цинку, то їх зареєстровано більше в насінні з регіону Румунії, а найменше – з регіону США. Мангану виявилось більше в насінні з регіону США, а найменше – з регіону України.

Таблиця 7.3. Вміст макроелементів у насінні конопель

Показник	Регіон виробництва насіння конопель	
	Україна (Oseyko M. et al., 2019)	США (Lan Y. et al., 2019)
Фосфор, г/кг	8,9	4,1
Кальцій, г/кг	0,9	-
Калій, мг/кг	-	-
Магній, г/кг	2,4	3,4

Таблиця 7.4. Вміст мікроелементів у насінні конопель

Показник	Регіон виробництва насіння конопель		
	Румунія (Mihos M. et al., 2013)	Україна (Oseyko M. et al., 2019)	США (Lan Y. et al., 2019)
Ферум, мг/кг	130–164	74,7	46,7
Цинк, мг/кг	42–57	56,1	28,2
Кобальт, мг/кг	-	0,5	-
Манган, мг/кг	89–108	59,4	169,1
Купрум, мг/кг	10–12	-	29,0
Нікель, мг/кг	1,6–6,1	-	41,0
Хром, мкг/кг	598–877	-	-
Молібден, мкг/кг	265–652	-	-
Плюмбум, мкг/кг	217–626	-	-

Узагальнені дані підтверджують, що компонентний склад і біологічна цінність насіння конопель залежить від регіону, умов вирощування та очевидно від якості насінневого матеріалу. Науковцям-селекціонерам слід звернути належну увагу на вдосконалення існуючих та розроблення нових сортів промислових конопель, залежно від їх основного та функціонального призначення (Oseyko M. et al., 2021).

### 7.3. Склад та показники якості насіння промислових конопель вітчизняної селекції

Насіння промислових конопель набуває все більшого попиту в харчуванні людини. До якості харчових продуктів висувуються найбільш жорсткі вимоги порівняно з будь-якими іншими промисловими виробами, оскільки від них безпосередньо залежить стан нашого здоров'я.

Для дослідження обрано насіння промислових конопель сорту Глесія, яке застосовують для переробки в харчові продукти такі, як ядро, олія, борошно,

білковий концентрат та клітковина. У рамках науково-технічної співпраці з ТОВ “Десналенд” (м. Глухів Сумської області) виконували дослідження на підприємстві, де переробляли дві партії насіння врожаю 2017 року сорту Глесія. Одна з партій (зразок № 1) була вирощена в умовах Інституту сільського господарства Північного Сходу НААН (с. Сад Сумської області), а друга (зразок № 2) – в умовах ІЛК НААН (м. Глухів Сумської області). Досліджували показники якості та склад двох зразків цього сорту, а також насіння промислових конопель сорту Гляна, вирощене в умовах ТОВ “Науково-дослідний інститут сої” (нині ТОВ “Інститут органічного землеробства”) агропромислової групи “Арніка” (м. Глобине Полтавської області) шляхом органічного землеробства.

Органолептичні та фізико-хімічні показники зразків визначали за стандартними та галузевими методиками.

### 7.3.1. Показники якості насіння промислових конопель сорту Глесія

Колір обох зразків був властивий насінню конопель, запах – здоровому насінню конопель, що відповідає вимогам ДСТУ 7695:2015 “Насіння конопель. Технічні умови” (табл. 7.5).

Таблиця 7.5. Фізико-хімічні показники якості насіння промислових конопель сорту Глесія

Показник	Зразок № 1	Зразок № 2	За ДСТУ 7695:2015
Масова частка вологи, %	8,36	8,38	не більше 11,00
Чистота насіння, %	98,63	96,68	не менше 90,00
Масова частка олії в перерахунку на суху речовину, %	33,62	33,33	не менше 30,00
Кислотне число, мг КОН/г	2,80	3,30	не більше 3,00
Вміст насіння рицини	не виявлено		не дозволено
Вміст насіння отруйних бур'янів	не виявлено		не дозволено
Зараженість шкідниками зерна	не виявлено		не дозволено

Як бачимо з даних табл. 7.5, майже всі показники якості відповідають вимогам ДСТУ 7695:2015, крім кислотного числа олії, виділеної з насіння зразка № 2 та підвищеного кислотного числа зразка № 1, що пов'язано з тривалим зберіганням (11 місяців) насіння перед дослідженням. Це свідчить про недоско-



налість технології зберігання насіння конопель.

Відомо, що традиційне аграрне виробництво застосовує пестициди для підвищення врожайності культур (фунгіциди, гербіциди, інсектициди, акарициди, мітіциди, родентициди). Крім того, доволі забруднене навколишнє середовище (стан ґрунту, води та повітря) може спричиняти підвищення токсичності насіння промислових конопель. Тому й було досліджено вміст токсичних елементів, мікотоксинів, радіонуклідів, пестицидів у насінні конопель (табл. 7.6).

Таблиця 7.6. Уміст шкідливих речовин у насінні промислових конопель сорту Глесія

Показник	Зразок № 1	Зразок № 2	Максимально допустимий рівень за ДСТУ 7695:2015
Токсичні елементи, мг/кг:			
свинець	0,050	0,002	0,50
кадмій	0,000	0,010	0,10
арсен	<0,100	<0,100	0,20
ртуть	<0,0002	<0,0002	0,03
мідь	0,000	0,013	10,00
цинк	0,140	0,100	50,00
Мікотоксини, мг/кг:			
афлатоксин В <sub>1</sub>	0,000	0,000	0,005
зеараленон	0,01	0,01	1,00
Т-2 токсин	0,00	0,00	0,10
Радіонукліди, Бк/кг:			
стронцій-90	0,00	0,00	20,00
цезій-137	2,80	2,30	50,00
Пестициди, мг/кг	не виявлено	не виявлено	Вміст пестицидів не повинен перевищувати граничнодопустимих рівнів, установлених у МБТи СН № 5061

Отримані дані підтверджують безпечність зразків насіння промислових конопель сорту Глесія 2017 року врожаю та можливість їх переробки в харчові конопляні продукти. Оскільки насіння промислових конопель сорту Глесія вільне від токсичних елементів, то вміст даних речовин у продуктах переробки цього насіння не визначали.

Додатково проведено перевірку деяких фізико-хімічних показників, характерних для білково-олійних культур, а також мінерального, вітамінного (табл.

7.7), амінокислотного (табл. 7.8) складу.

Дослідження якості насіння промислових конопель як сировини для харчових продуктів було б неповним без визначення ГМО. Генетичної модифікації у зразках насіння промислових конопель сорту Глесія не виявлено.

Таблиця 7.7. Характеристика фізико-хімічних показників якості насіння промислових конопель, які не передбачені ДСТУ 7695:2015

Показник	Зразок № 1	Зразок № 2	Дані наукової літератури (Vonapartis E. et al., 2015; Клевцов К. М., 2015; Мінос М. et al., 2012)
1	2	3	4
Насипна маса, г/л	556,50	535,00	513,00
Маса 1000 насінин, г	18,23	17,92	17,72
Щільність укладання, %	65,65	58,24	-
Шпаруватість, %	34,35	41,76	82,33
Забезпеченість повітрям, см <sup>3</sup> /г	0,62	0,78	-
Масова частка золи, %*	4,99	5,91	2,5–7,0
Масова частка протеїну, %*	24,70	22,54	17,0–28,0
Масова частка клітковини, %*	36,85	32,25	14,0–38,8
Масова частка вітамінів, мг/100 г:			
В <sub>1</sub>	1,21	не визначали	0,90
В <sub>2</sub>	0,07		1,10
В <sub>3</sub> (РР)	4,10		2,50
В <sub>9</sub>	36,10		-
С	7,20		1,40
Масова частка мінеральних речовин*:			
фосфор, г/кг	8,35	8,90	-
кальцій, г/кг	0,82	0,86	1,44–9,55
магній, г/кг	2,57	2,42	2,37–6,94
ферум, мг/кг	87,68	74,71	113,3–240,0
цинк, мг/кг	58,16	56,08	4,20–9,40
кобальт, мг/кг	0,51	0,52	-
манган, мг/кг	69,51	59,38	6,30–11,00

Примітка. \* – у перерахунку на сухі речовини.

Оскільки насіння конопель відносять до білково-олійних культур, то було проведено амінокислотний аналіз насіння промислових конопель (табл. 7.8).

Таблиця 7.8. Амінокислотний склад насіння промислових конопель  
сорту Глесія

Амінокислота	“з” чи “нз”**	Зразок № 1		Зразок № 2	
		кількість, мг/100 г	%	кількість, мг/100 г	%
Аланін	“з”	735	5,27	642	5,52
Аргінін	“з”**	1647	11,80	1409	12,11
Аспаргінова кислота	“з”	1359	9,74	1100	9,45
Валін	“нз”	445	3,19	351	3,02
Гістидин	“з”**	413	2,96	326	2,80
Гліцин	“з”	740	5,30	644	5,54
Глутамінова кислота	“з”	2870	20,56	2370	20,37
Ізолейцин	“нз”	374	2,68	323	2,78
Лейцин	“нз”	913	6,54	791	6,79
Лізін	“нз”	788	5,64	661	5,68
Метіонін	“нз”	302	2,17	263	2,26
Пролін	“з”	673	4,82	593	5,09
Серин	“з”	824	5,90	565	5,64
Тирозин	“з”	469	3,36	383	3,29
Треонін	“нз”	555	3,98	438	3,77
Триптофан	“нз”	не визначали			
Фенілаланін	“нз”	653	4,68	525	4,51
Цистеїн	“з”	197	1,41	163	1,40
Всього		13958	100,00	11639	100,00

Примітка. \* “з” – замінна амінокислота; “нз” – незамінна амінокислота.

\*\* – для дітей незамінна.

Доведено, що насіння конопель має унікальний білковий склад за рахунок умісту незамінних амінокислот: валіну, ізолейцину, лейцину, лізину, метіоніну, треоніну, триптофану, фенілаланіну. У насінні конопель вміст триптофану становить 390 мг на 100 г (<http://nectar.com.ua>).

### 7.3.2. Показники якості насіння промислових конопель сорту Гляна

Відповідно до Закону України “Про виробництво та обіг органічної сільськогосподарської продукції та сировини” органічну рослинну сировину вирощують без застосування хімічних добрив, пестицидів, ГМО, консервантів тощо. Всі етапи вирощування та переробки органічної сировини передбачають застосування методів, принципів та правил, визначених Законом України “Про виробництво та обіг органічної сільськогосподарської продукції та сировини” для

одержання натуральної (екологічно чистої) продукції, а також збереження та відновлення природних ресурсів.

Традиційну (неорганічну) сировину виготовляють за загальноприйнятими технологіями в аграрному виробництві, застосовуючи хімічні засоби захисту та синтетичні мінеральні добрива. При переробці такої сировини в харчові продукти можна додавати консерванти, штучні барвники, стимулятори росту, гормони, антибіотики, ароматизатори, стабілізатори, підсилювачі смаку тощо, відповідно до чинного законодавства.

Перехідний (конверсійний) період – це час переходу від виробництва традиційної (неорганічної) продукції (сировини) до виробництва органічної продукції (сировини). Його тривалість зазвичай становить 1–3 роки.

Визначено показники безпеки та фізико-хімічні показники насіння промислових конопель сорту Гляна врожаю 2017 року, вирощеного шляхом органічного та конверсійного виробництва (табл. 7.9, 7.10).

Таблиця 7.9. Фізико-хімічні показники якості насіння промислових конопель сорту Гляна

Показник	Вміст у насінні промислових конопель		Норми за ДСТУ 7695:2015
	органічному	конверсійному	
Масова частка води, %	7,70	7,39	<11,00
Масова частка протеїну, %*	26,68	25,72	-
Масова частка клітковини, %*	30,24	24,69	-
Масова частка олії, %*	33,45	33,60	>30,00
Масова частка золи, %*	4,47	4,72	-
Вміст домішок, %	0,10	0,20	<10,00
Вміст насіння рицини	0,00	0,00	не дозволено
Вміст насіння отруйних бур'янів	0,00	0,00	
Зараженість шкідниками зерна	0,00	0,00	
Маса 1000 насінин, г	16,94	20,26	-
Кислотність олії, %	1,13	1,23	<3,00
Йодне число, г/100 г	152,00	154,00	-
Вміст фосфоровмісних речовин, мг/кг	268,00	150,00	-

Примітка. \* – у перерахунку на суху речовину.

Таблиця 7.10. Вміст токсичних елементів у насінні промислових конопель сорту Гляна

Масова частка токсичного елемента, мг/кг	Вміст у насінні промислових конопель		Максимально допустимий рівень за ДСТУ 7695:2015
	органічному	конверсійному	
Плюмбум	<0,22	<0,22	<0,50
Кадмій	0,005	0,003	<0,10
Арсен	<0,10	<0,10	<0,20
Купрум	12,36	12,49	<10,00
Цинк	55,43	51,57	<50,00

Колір обох зразків був властивий насінню конопель, запах – характерний здоровому насінню конопель, що відповідає вимогам ДСТУ 7695:2015 “Насіння конопель. Технічні умови”.

Практично за всіма показниками якості насіння органічних промислових конопель переважає конверсійне, особливо за вмістом фосфоровмісних речовин.

Дані досліджень свідчать про те, що вміст Pb, Cd та As у насінні не перевищує норм, а вміст Cu та Zn дещо не відповідає вимогам ДСТУ 7695:2015. Це підтверджує потужну здатність рослини конопель до фітореMediaції.

Досліджено вміст токсинів у насінні промислових конопель, результати яких наведено в табл. 7.11. Очевидною є відсутність токсинів у насінні як органічних, так і конверсійних промислових конопель.

Таблиця 7.11. Вміст токсинів у насінні промислових конопель сорту Гляна

Показники, мг/т	Вміст у насінні промислових конопель		Граничні норми за європейською нормативною документацією, мг/т	Норми за ДСТУ 7695:2015, мг/кг
	органічному	конверсійному		
Афлатоксин В <sub>1</sub>	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,005
Афлатоксини (В <sub>1</sub> , В <sub>2</sub> , G <sub>1</sub> , G <sub>2</sub> )	< 2,0	< 2,0	< 2,0	-
Деоксиніваленол (вомітоксин)	< 250,0	< 250,0	< 250,0	-
Охратоксин А	< 0,4	< 0,4	< 0,4	-
Зеараленон	< 5,0	< 5,0	< 5,0	< 1,0
Т-2/НТ-2 токсин	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 0,1
Фумозініни (В <sub>1</sub> + В <sub>2</sub> )	< 250,0	< 250,0	< 250,0	-

Визначення вмісту пестицидів (хлорорганічних та фосфорорганічних, піретроїдів, карбаматів, триазолів та інших) у зразках органічного і конверсійного насіння промислових конопель показало, що сліди пестицидів у даних зразках відсутні.

#### **7.4. Технологічні параметри обрушування насіння промислових конопель**

Конопляне ядро – цінний продукт, що належить до “суперфудів”. У технології комплексної переробки насіння конопель одержання ядра є самостійним технологічним процесом. Основна мета обрушування – це звільнення м’якого насінневого ядра від захисної твердої оболонки. По-перше, це підвищує засвоюваність корисних речовин, на які багате насіння, по-друге, дозволяє покращити смакові якості продукту.

##### **7.4.1. Визначення впливу технологічних параметрів процесу обрушування на чистоту ядра**

С. П. Коропченком та Д.О. Петраченком (2018) розроблено пристрій для обрушування насіння конопель (рис. 7.2), що дає можливість переробляти насіння, в якому міститься до 15 % органічних сміттєвих домішок. Однак чим більша засміченість насіння, тим складніший процес розділення рушанки та очищення ядра, а наявність великої кількості домішок (до 15 %) безумовно негативно впливає на чистоту готового ядра. Як показує практика, наявність в обрушеному насінні навіть незначної (2–3 %) частини сміттєвих домішок (лушпиння, недорученого насіння, насінневих домішок інших культур) істотно погіршує смакові відчуття під час вживання продукту. Тому питання дослідження чистоти обрушеного ядра є актуальним.

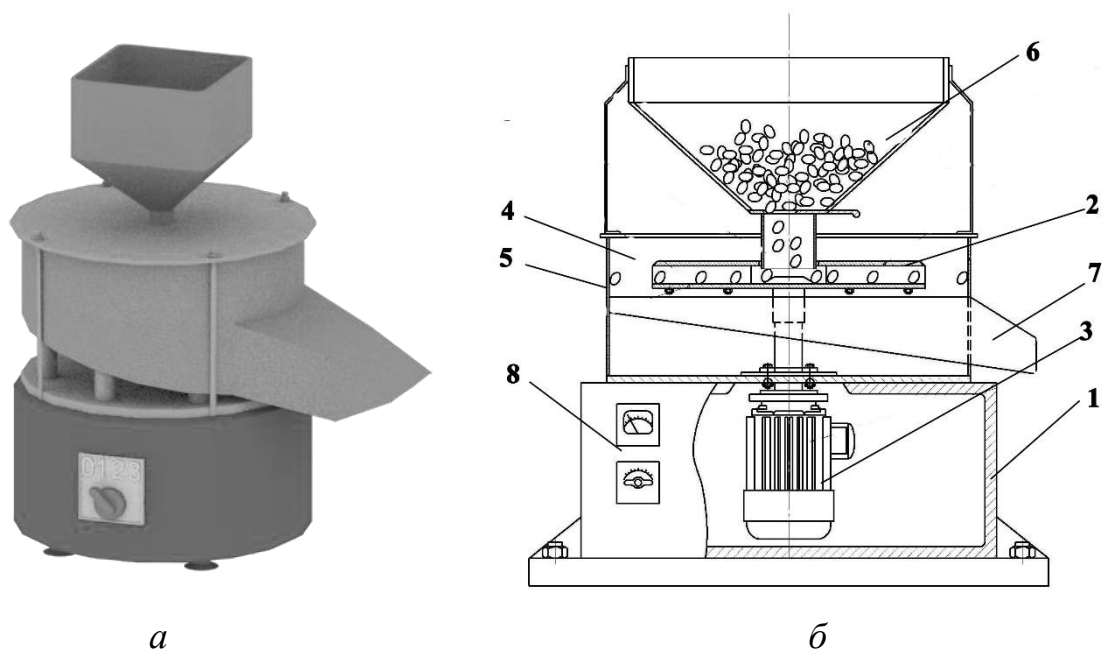


Рис. 7.2. Пристрій для обрушування насіння конопель

*a* – загальний вигляд; *б* – схема:

- 1 – рама (станина, корпус, основа); 2 – робоче колесо; 3 – електродвигун;  
 4 – робоча камера; 5 – відбійна дека; 6 – бункер; 7 – вивантажувальний лоток;  
 8 – прилади керування

Насіння промислових конопель завантажували в бункер 6 пристрою для обрушування. Через патрубок та завантажувальний отвір у верхньому диску воно потрапляло на нижній диск 2. Насіння під дією відцентрових сил починало рухатися в горизонтальній площині на профільних каналах у напрямку відбійної деки 5, у момент контакту насінини з якою відбувалося руйнування плодової оболонки та вивільнення ядра. Рушанка падала на вивантажувальний лоток 7 та під дією вібрації виводилася з пристрою.

Наступним етапом було просіювання рушанки на ситах з круглими та довгастими отворами. Розділення за аеродинамічними властивостями проводили з використанням гравітаційного повітряного сепаратора з розімкнутим вертикальним повітряним циклом, який призначений для відділення легких домішок у процесі розділення насінневих сумішей.

Розділення за лінійними розмірами проводили з використанням установлених один над одним набору лабораторних сит з круглими та довгастими ро-

бочими отворами.

Насіння промислових конопель, яке призначено для обрушування, надходило зі складу зберігання. Вологість насіння становила  $W=8,8-9,2$  %. Відповідно до робочої гіпотези про вплив геометричних розмірів насіння конопель на якість готового ядра, перед обрушуванням насіння поділяли на три фракції за шириною. Для цього використовували лабораторні сита з отворами довгастої форми розмірами  $3,0 \times 20,0$  мм та  $2,5 \times 20,0$  мм. У результаті одержали три фракції насіння: товщина понад 3,0 мм; менше 3,0–більше 2,5 мм; менше 2,5 мм. Досліджено кожен з фракцій.

До органічних сміттєвих домішок насіння конопель відносять кострицю, листя, насіння зернових, бобових, олійних культур, насіння бур'янів тощо. Для дослідження використовували насіння промислових конопель чистотою 99,0; 92,0 та 85,0 %.

Після обрушування чистого відкаліброваного насіння рушанку розбирали на складові для визначення відсоткового вмісту кожного окремого компонента в зразку. Після розділення одержаної проби вимірювали і фіксували вагу окремих компонентів. Далі виконували математичну обробку даних (Кошовий М. Д. та ін., 2010).

У процесі переробки одержали готове ядро, січку, недоруш та відходи (насіннева оболонка, пил, дрібно розмелене ядро, органічні домішки) – рис. 7.3.

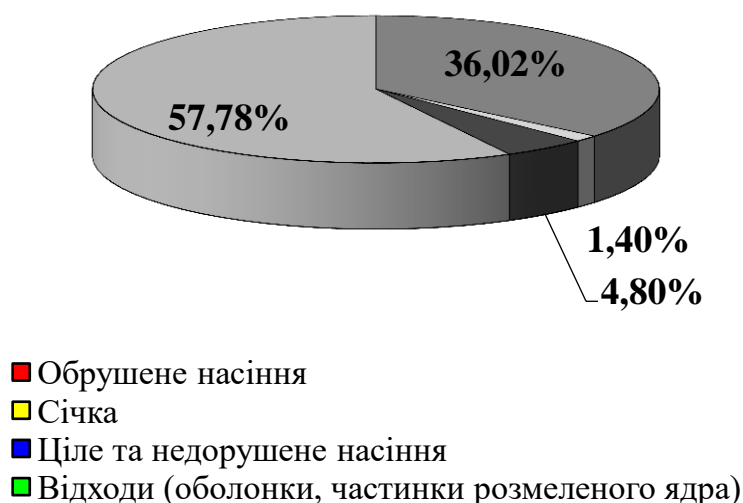


Рис. 7.3. Розподіл складових рушанки за фракціями



Відходи виробництва у вигляді оболонки та часток розмеленого насіння використовують на кормові, будівельні або енергетичні потреби. Ціле та недоручене насіння пускають на повторне обрешування. Процес виконують двічі.

Досліджено ступінь впливу фізико-механічних властивостей насіння та технологічних параметрів пристрою для обрешування на чистоту обрешеного ядра за допомогою багатофакторного експерименту (ПФЕ<sup>3</sup>). Умови експерименту та його фактори були визначені на основі результатів раніше проведених однофакторних дослідів.

У процесі проведення ПФЕ<sup>3</sup> факторами, що досліджували, були частота обертання робочого колеса ( $X_1$ ), чистота насіння ( $X_2$ ), фракція насіння за шириною ( $X_3$ ), табл. 7.12.

Таблиця 7.12. Рівні факторів та їх натуральні значення

Фактор	Натуральне значення	Інтервал варіювання	Натуральні рівні варіювання		
			верхній (+)	нульовий	нижній (-)
Частота обертання колеса, об/хв	$X_1$	500	2500	2000	1500
Чистота насіння, %	$X_2$	7	99	92	85
Фракція насіння (товщина), мм	$X_3$	0,5	понад 3	від 3,0 до 2,5	менше 2,5

Параметром оптимізації при проведенні експерименту було обрано показник – кількість сміттєвих домішок у готовому обрешеному насінні. Умови проведення експерименту та результати дослідження наведено в табл. 7.13.

Лінійне рівняння регресії має вигляд:

$$Y=B_0+B_1X_1+B_2X_2+B_3X_3+B_{1,2}X_1X_2+B_{1,3}X_1X_3+B_{2,3}X_2X_3. \quad (7.1)$$

Після проведення розрахунків одержали такі значення коефіцієнтів рівняння регресії:

$$\begin{aligned}
 B_0 &= 2,221; & B_{1,2} &= 0,362; \\
 B_1 &= -0,638; & B_{1,3} &= -0,002; \\
 B_2 &= -1,467; & B_{2,3} &= 0,130. \\
 B_3 &= -0,171;
 \end{aligned}$$

Далі числові значення коефіцієнтів підставляли в рівняння регресії:

$$Y = 2,221 - 0,638X_1 - 1,467X_2 - 0,171X_3 + 0,362X_{12} - 0,002X_{13} + 0,130X_{23}. \quad (7.2)$$

Таблиця 7.13. Умови проведення експерименту і результати досліджень

№ дослі- ду	Значення параметра оптимізації					Середнє	Дисперсія, S
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5		
1	4,96	5,00	4,93	4,91	5,03	4,97	0,0024
2	2,98	3,04	2,95	3,03	3,05	3,01	0,0018
3	1,14	1,07	1,1	1,03	1,12	1,09	0,0019
4	0,57	0,54	0,49	0,51	0,39	0,5	0,0047
5	4,45	4,34	4,42	4,38	4,46	4,41	0,0025
6	2,36	2,39	2,30	2,38	2,41	2,37	0,0018
7	1,02	0,93	0,98	0,91	1,01	0,97	0,0023
8	0,40	0,53	0,45	0,48	0,42	0,46	0,0026

Наступним етапом статистичного аналізу була перевірка відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена, табличне значення якого за довірчої вірогідності  $\alpha = 0,95$  та числа ступенів вільності  $f = 4$  дорівнює  $K_m = 0,62$ .

Розрахункове значення критерію Кохрена  $K_p = 0,23$ :

$$0,23 < 0,62.$$

Умова виконується, тому досліді можна вважати відтворюваними.

Далі знаходимо дисперсію відтворюваності, дисперсію коефіцієнтів рівняння регресії, середньоквадратичне відхилення (табл. 7.14).

Таблиця 7.14. Результати статистичного аналізу отриманих даних

Дисперсія відтворюваності	Дисперсія всіх коефіцієнтів регресії	Середньоквадратичне відхилення
0,000628	0,000016	0,00396

За допомогою критерію Стюдента розраховуємо значимість коефіцієнтів рівняння регресії. Користуючись додатком (Кошовий М. Д. та ін., 2010), знаходимо табличне значення критерію Стюдента, яке за числа ступенів вільності  $f = 32$  дорівнює  $t_m = 2,04$ . Розрахункові значення критерію Стюдента дорівнюють:

$$\begin{aligned} t_0 &= 560,60; & t_{1,2} &= 91,23; \\ t_1 &= -161,00; & t_{1,3} &= -0,25; \\ t_2 &= -370,20; & t_{2,3} &= 32,55. \\ t_3 &= -43,03; \end{aligned}$$

Таким чином, за даних умов проведення експерименту коефіцієнт  $B_{1,3}$  не має впливу на параметр оптимізації  $Y$ , через що його виключено з даного рівняння. В остаточному варіанті рівняння регресії набуло вигляду:

$$Y = 2,221 - 0,638X_1 - 1,467X_2 - 0,171X_3 + 0,362X_{12} + 0,130X_{23}. \quad (7.3)$$

Придатність (адекватність) одержаної математичної моделі (рівняння регресії) перевірили за критерієм Фішера. Для цього знайшли розрахункове значення критерію Фішера як відношення дисперсії адекватності до дисперсії відтворюваності (табл. 7.15).

Таблиця 7.15. Результати розрахунку адекватності рівняння регресії

Дисперсія відтворюваності	Дисперсія адекватності	Розрахункове значення критерію Фішера
0,000628	0,0002	0,318

Користуючись додатком (Кошовий М. Д., 2010), визначаємо табличне значення критерію Фішера, яке за вірогідності  $\alpha = 0,95$ , числа ступенів вільності дисперсії адекватності  $f_A = 1$  та числа ступенів вільності дисперсії відтворюваності  $f_B = 32$  становить  $F_m = 4,2$ .

$$0,318 < 4,2$$

Згідно з умовою адекватності, розрахункове значення критерію Фішера менше табличного, що підтверджує придатність даної математичної моделі в межах досліджуваних факторів.

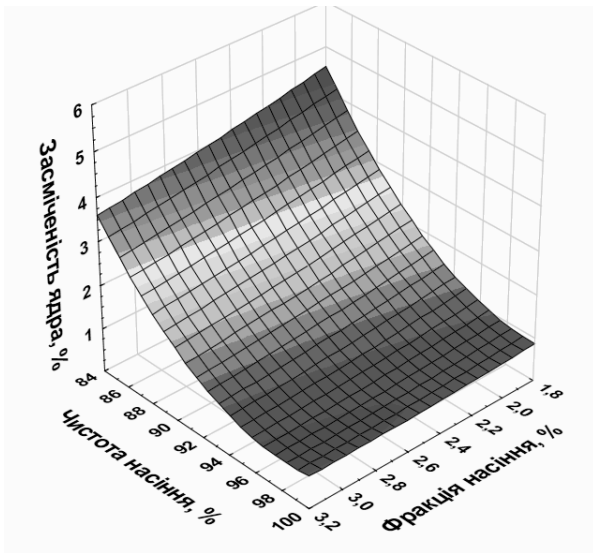
Залежність зміни чистоти готового обрешеного ядра від факторів, що досліджували, зображена на рис. 7.4 у вигляді поверхней відгуку.

Аналіз одержаного рівняння регресії (7.3) показує, що на засміченість готового ядра впливають три фактори, про що свідчать відповідні коефіцієнти: зі зменшенням чистоти насіння, що надходить на обрешування; зі зменшенням частоти обертання робочого органа та зменшенням фракції насіння – засміченість готового ядра збільшується. Для встановлених значень зміни факторів найбільший вплив на кількість сміттєвих домішок у готовому продукті має чистота насіння ( $X_2$ ), яке надходить на обрешування. Далі за ступенем впливу слідує частота обертання робочого органа ( $X_1$ ). Фактор – фракція насіння ( $X_3$ ) має найменший вплив на засміченість серед досліджуваних факторів.

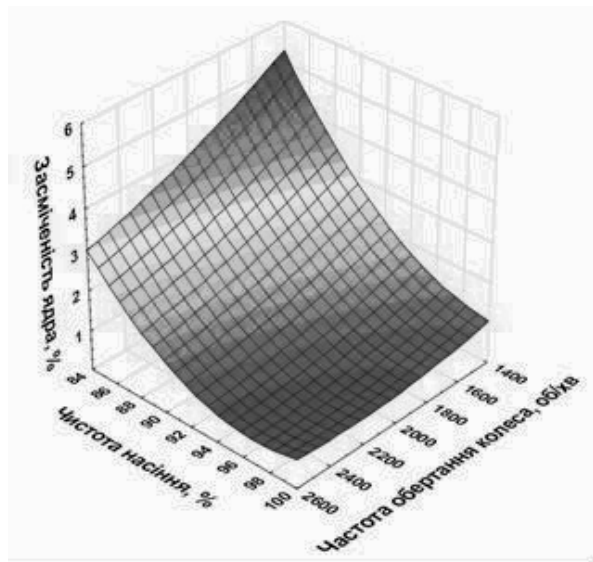
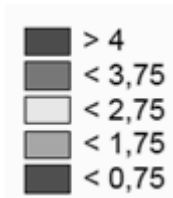
Аналіз представлених даних (рис.7. 4,а) показує, що при чистоті насіння конопель 99,0 % вплив фракції насіння на засміченість готового ядра нівелюється: одержано стабільно чисте ядро, засміченість якого не перевищує 1,0 %. Зниження чистоти насіння до 85,0 % за одночасного зменшення розміру насіння (менше 2,5 мм) суттєво підвищує засміченість готового продукту до 5,5 %.

Зображення на рис. 7.4,б свідчить про те, що за чистоти насіння 99,0 %, дослідженого діапазону частоти обертання робочого органа (1500–2500 хв<sup>-1</sup>) одержано ядро з мінімальним умістом сміттєвих домішок – до 1,0 %. Зниження рівня чистоти насіння до 85,0 % та обертів робочого органа до 1500 хв<sup>-1</sup> максимально підвищують засміченість ядра до 5,5 %.

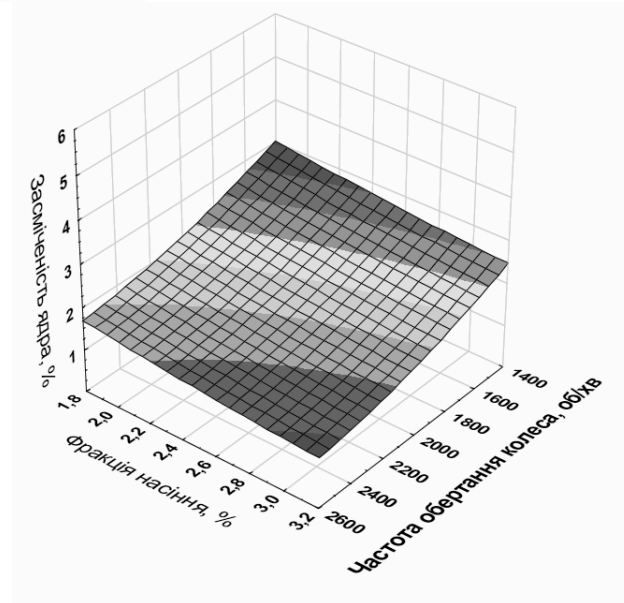
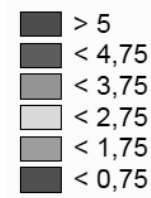
Аналіз результатів (рис. 7.4,в) підтверджує, що зі зниженням обертів робочого колеса (1500 хв<sup>-1</sup>) та зменшенням розміру насіння (менше 2,5 мм) збільшується засміченість ядра максимально 3,0 %.



*a*



*б*



*в*



Рис. 7.4. Залежність чистоти готового обрушеного ядра від досліджуваних факторів:

*a* – чистота насіння–фракція насіння; *б* – чистота насіння–частота обертання робочого органа; *в* – фракція насіння–частота обертання робочого органа

Незважаючи на відмінну роботу відцентрового обрушувача із сировиною з максимальною засміченістю (15,0 %), все ж таки необхідно прагнути до міні-

мального вмісту сміттєвих домішок в оброблюваному насінні. Лише з чистого насіння (99,0 %) можна одержати обрушене ядро, засміченість якого не перевищує 1,0 %. Доведено також, що вплив зміни фракції насіння практично відсутній.

#### **7.4.2. Визначення впливу технологічних параметрів процесу обрушування на вихід ядра**

Крім чистоти готового продукту, важливим параметром процесу обрушування насіння конопель є його вихід.

Задачею дослідження було одержання максимально можливої кількості конопляного ядра. У ході досліджень визначено перелік технологічних факторів, що впливають на вихід ядра: початкова вологість сировини, її чистота та частота обертання робочого органа пристрою.

На першому етапі досліджень визначали залежність виходу обрушеного насіння конопель від початкової вологості сировини за сталих чистоті насіння та обертах робочого органа машини. Обрушування насіння конопель здійснювали на пристрої для обрушування (рис. 7.2) за таких умов: відбрали 1 кг насіння промислових конопель вологістю 6,0–21,0 %, чистотою – 99,0 % завантажували в пристрій для обрушування конопель. Частота обертання робочого органа –  $1850 \pm 50$  хв<sup>-1</sup>, час обрушування – 2 хв. Одержану рушанку просіювали на лабораторних ситах. Недоручене насіння конопель повторно пропускали через пристрій для обрушування. Процес виконували двічі.

Результати показують, що підвищення вологості насіння промислових конопель з 7,0 до 21,0 % сприяє підвищенню виходу ядра з 30,1 до 41,8 % (рис. 7.5). Оскільки насіння на обрушування надходить зі стадії зберігання з вологістю 8,0–11,0 %, то для проведення досліджень його додатково зволожували. Подальше зволоження, яке перевищує 21,0 %, не збільшує вихід готового продукту.

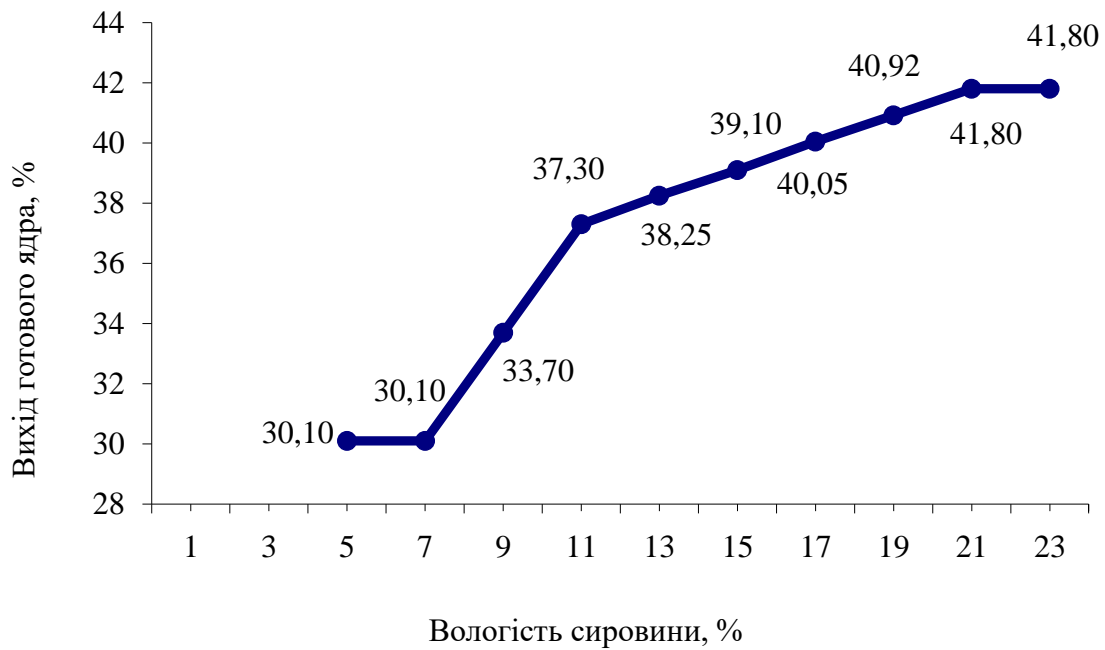


Рис. 7.5. Залежність виходу конопляного ядра від вологості сировини

На другому етапі досліджень необхідним було встановити залежність виходу конопляного ядра від частоти обертання робочого органа пристрою для обрушування за сталих чистоти насіння та початкової вологості сировини. Обрушування насіння конопель також здійснювали на пристрої для обрушування (рис. 7.2) в таких умовах: 1 кг насіння промислових конопель вологістю 11,0 %, чистотою – 99,0 % завантажували в пристрій для обрушування конопель. Частота обертання робочого органа –  $1000\text{--}2500 \text{ хв}^{-1}$ , час обрушування – 2 хв. Одержану рушанку просіювали на лабораторних ситах. Недоручене насіння конопель повторно пропускали через пристрій для обрушування. Процес виконували двічі. Результати досліджень наведено на рис. 7.6.

Як відомо, процес обрушування насіння заснований на тому, що насінина під дією відцентрової сили вдаряється об відбійну деку, оболонка розколюється і ядро вивільняється. Відповідно, чим швидше рухається робочий орган пристрою для обрушування, тим більшим очікується вихід конопляного ядра. Це підтверджують дані, наведені на рис. 7.6. Оскільки насіння конопель має високий вміст олії, а його ядро досить м'яке, то збільшення кількості обертів робо-

чого органа призводить до значних руйнувань одержаного ядра і підвищує втрати готового продукту, відповідно. Тому оптимальною є частота обертання робочого органа  $1850 \text{ хв}^{-1}$ .



Рис. 7.6. Залежність виходу обрубленого насіння конопель від частоти обертання робочого органа

На третьому етапі досліджень визначали залежність виходу конопляного ядра від чистоти сировини за сталих вологості насіння та обертах робочого органа машини. Обрушування насіння конопель здійснювали за таких умов: 1 кг насіння промислових конопель вологістю 11,0 %, чистотою – 97,0–99,0 % завантажували в пристрій для обрушування конопель. Частота обертання робочого органа –  $1850 \pm 50 \text{ об./хв}$ , час обрушування – 2 хв. Одержану рушанку просіювали на лабораторних ситах. Недоручене насіння конопель повторно пропускали через пристрій для обрушування. Процес повторювали двічі.

Наведені на рис. 7.7 дані показують, що чистота сировини не має значного впливу на вихід обрубленого насіння конопель за умови, що вона повинна знаходитися в межах 97–99 %.

Дослідженнями, які представлені раніше, виявлено, що основними техно-



логічними факторами, які впливають на ефективність процесу обрешування, є вологість сировини та швидкість обертання робочого органа пристрою.



Рис. 7.7. Залежність виходу обрешеного насіння конопель від чистоти сировини

З метою вивчення ступеня впливу технологічних параметрів обрешування насіння конопель на вихід цільового продукту, а також на скорочення терміну пошуку ефективних умов проведення цього процесу і кількості дослідів було застосовано метод повного факторного планування експерименту.

На основі апріорної інформації, серії пошукових дослідів, техніко-економічних міркувань і відповідності цільового продукту нормативним документам були встановлені технологічні фактори, які визначають ефективність даного технологічного процесу:

$X_1$  – вологість насіння конопель, %;

$X_2$  – частота обертання робочого органа,  $\text{хв}^{-1}$ ;

$X_3$  – чистота насіння конопель, %.

Критерієм оцінки впливу технологічних параметрів на процес обрешування насіння конопель обрано вихід обрешеного ядра –  $Y$ . Задача полягала в проведенні повного факторного експерименту типу  $2^3$ , матриця планування

якого наведена в табл. 7.16.

Таблиця 7.16. Матриця планування експерименту

Характеристика межі	Технологічні фактори		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Основний рівень (0)	13,5	1750	98
Інтервал варіювання	7,5	750	1
Верхній рівень (+1)	21,0	2500	99
Нижній рівень (-1)	6,0	1000	97
Номер дослідю:			
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Експерименти, які проведені в даній області, дали задовільні результати щодо якості та параметра оптимізації (функції відгуку) – табл. 7.17. Вихід конопляного ядра, одержаний за базовим дослідом, становив 35,8 %.

Таблиця 7.17. Реалізація матриці планування експерименту процесу обрушування насіння конопель

Номер дослідю	Технологічні фактори			Функція відгуку	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y^e$	$Y^p$
1	6	1000	97	29,8	29,6
2	21	1000	97	39,0	39,2
3	6	2500	97	30,1	30,3
4	21	2500	97	41,0	40,8
5	6	1000	99	29,3	29,5
6	21	1000	99	41,5	41,3
7	6	2500	99	29,5	29,3
8	21	2500	99	41,8	42,0

За допомогою математичної обробки експериментальних даних, яку проведено за матрицею планування, побудували інтерполяційну формулу процесу обрушування насіння конопель в області, що досліджувалася, загальний вигляд якої зображено рівнянням регресії (7.1).

Змінні, які закодовані, пов'язані з вологістю сировини, частотою обертання робочого органа та чистотою насіння:

$$X_{01} = \frac{X_{01} - X_{01}}{X_{01}}; \quad X_{02} = \frac{X_{02} - X_{02}}{X_{02}}; \quad X_{03} = \frac{X_{03} - X_{03}}{X_{03}},$$

де  $X_{01}, X_{02}, X_{03}$  – натуральні значення змінної на нульовому рівні.

Коефіцієнти регресії визначали за формулою:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ji} Y_i^e, \quad (7.4)$$

$$b_0 = 35,250;$$

$$b_{12} = 0,225;$$

$$b_1 = 5,575;$$

$$b_{13} = 0,550;$$

$$b_2 = 0,350;$$

$$b_{23} = -0,225.$$

$$b_3 = 0,275;$$

Для встановлення значущості коефіцієнта розраховано оцінку дисперсності:

$$S_b^2 = \frac{S_{\bar{y}}^2}{N}, \quad (7.5)$$

де  $S_{\bar{y}}^2$  – оцінка однорідних дисперсій декількох серій паралельних дослідів:

$$S_{\bar{y}}^2 = \frac{S_y^2}{2}; \quad (7.6)$$

$N$  – число дослідів ПФЕ;  $N = 8$ .

Оцінка дисперсії для кожного досліджу:

$$S_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (Y_{ij} - Y_j)^2, \quad (7.7)$$

де  $k$  – кількість паралельних дослідів, проведених при однакових умовах;  $k = 2$ ;

$j$  – номер досліджу;

$i$  – номер параметра.

Серед усіх оцінок дисперсій знаходимо найбільшу, за допомогою якої перевіряємо відтворення дослідів:

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} = 0,356. \quad (7.8)$$

Ця величина є розрахунковим значенням критерію Кохрена. Значення критерію Кохрена  $G$  за додатком (Кошовий М. Д. та ін., 2010) відповідає довірчій вірогідності  $P = 0,95$ , з якою приймається гіпотеза про відтворення дослідів.

$G_{табл.} = 0,680$  – значення критерію Кохрена, знайдене для таких параметрів:  $N = 8$ ;  $f = k - 1 = 2 - 1 = 1$ ,  
де  $f$  – число ступенів вільності.

Досліди допускаємо відтвореними, якщо  $G_p \leq G_{табл.}$ . Згідно з додатком (Кошовий М. Д. та ін., 2010)  $G_{табл.} = 0,680$ ;  $0,356 < 0,680$  і досліди є відтворюваними.

Похибка у визначенні коефіцієнтів регресії дорівнюватиме:

$$S_b = \sqrt{\frac{S_{\bar{y}}^2}{N}} = 0,042. \quad (7.9)$$

Коефіцієнт регресії вважається значимим за умови, якщо:

$$|b| \geq S_b \cdot t, \quad (7.10)$$

де  $t$  – значення критерію Стьюдента.

Користуючись згаданим додатком, знаходимо, що для довірчої вірогідності  $P = 0,95$  і числа ступеня вільності  $f = N \cdot (k - 1) = 8 \cdot (2 - 1) = 8$ , табличне значення критерію Стьюдента – 2,31, а  $S_b \cdot t = 0,097$ :

$$\begin{aligned} |b_0| &= 35,250 > 0,097; & |b_{12}| &= 0,225 > 0,097; \\ |b_1| &= 5,575 > 0,097; & |b_{13}| &= 0,550 > 0,097; \\ |b_2| &= 0,350 > 0,097; & |b_{23}| &= |-0,225| > 0,097. \\ |b_3| &= 0,275 > 0,097; \end{aligned}$$

Таким чином, усі коефіцієнти є значимими.

Одержане рівняння регресії має вигляд:

$$Y = 35,250 + 5,575 \cdot X_1 + 0,350 \cdot X_2 + 0,275 \cdot X_3 + 0,225 \cdot X_1 \times X_2 + 0,550 \cdot X_1 \times X_3 - 0,225 \cdot X_2 \times X_3 \quad (7.11)$$

Для перевірки адекватності рівняння регресії, тобто його здатності адекватно описувати поверхню відгуку, визначаємо експериментальне значення критерію Фішера за формулою

$$F_p = \frac{S_{ad.}^2}{S_y^2}, \quad (7.12)$$

де  $S_{ad.}^2$  – дисперсія адекватності розрахована за формулою:

$$S_{ad.}^2 = \frac{1}{N - B} \sum_{j=1}^8 (y_j^e - y_j^p)^2; \quad (7.13)$$

де  $B$  – число коефіцієнтів регресії рівняння, включаючи вільний член = 7;

$y_j^e, y_j^p$  – експериментальне і розрахункове значення функції відгуку в  $j$ -му експерименті (табл. 7.14);

$S_y^2$  – дисперсія відтворення:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2 = 0,028. \quad (7.14)$$

Тоді

$$F_p = \frac{S_{ad.}^2}{S_y^2} = 1,422.$$

Значення критерію Фішера не перевищує табличного значення (Кошовий М. Д. та ін., 2010):

$$F_p \leq F;$$
$$1,422 < 238,88.$$

Відповідно рівняння регресії є адекватним.

Одержана емпірична залежність являє собою залежність виходу конопляного ядра як функцію від вологості сировини, частоти обертання робочого органа та чистоти насіння. Аналіз одержаного рівняння регресії дозволяє зробити такі висновки:

- 1) найбільш значущим фактором є вологість сировини;
- 2) вплив взаємодії вологості та чистоти сировини більший, ніж просто чистоти;
- 3) від'ємний знак коефіцієнта регресії вказує на те, що зі збільшенням фактора величина параметра оптимізації буде зменшуватися.

У процесі обрушування насіння промислових конопель відбувається очищення ядра від оболонки; зменшення вологості готового продукту порівняно зі сировиною; збільшення частоти обертання робочого органа понад

2500 хв<sup>-1</sup> не приводить до підвищення виходу обрушеного насіння. Температура проведення процесу обрушування насіння промислових конопель не має технологічного впливу, тому рекомендовано проводити обрушування при температурі навколишнього середовища. Таким чином, обрушування насіння конопель проводять при вологості від 6,0 до 11,0 %, чистоті 99,0 % та частоті обертання робочого органа 1850 хв<sup>-1</sup>.

Відповідно до одержаних експериментальних закономірностей виробництва конопляного ядра та встановлених доцільних параметрів цього процесу розроблено структурну схему (рис. 7.8). Для одержання виходу конопляного ядра понад 30 % необхідно використовувати насіння вологістю 11 % з чистотою 99 %. Після обрушування отримують рушанку (рис. 7.9), яку просіюють на сито-повітряному сепараторі для розділення на готове ядро (далі – на фасування в дой-паки), січку, відходи (використовують на корм тваринам або для виробництва паливних пелетів чи гранул) та недоруш (недорушене та ціле насіння, яке повертають на обрушування або направляють на виробництво олії).

Запропонована технологія дозволяє отримати близько 35 % готового продукту, до того ж побічні продукти не утилізують, а використовують на інші цілі, що обумовлює ресурсозбереження. Відзначимо, що коноплі – це дводольна рослина (<https://uk.wikipedia.org>), як наслідок при виробництві обрушеного насіння одержують не цілісне ядро, а у вигляді двох дольок; від удару ці дольки можуть подрібнитися на менші частинки.

### **7.4.3. Характеристика готового продукту – конопляного ядра**

З метою встановлення якості ядра було досліджено його органолептичні, фізико-хімічні, мікробіологічні показники та склад, а також зроблено порівняльний аналіз зі складом початкової сировини. Всі показники якості конопляного ядра визначали за стандартними та галузевими методиками.

В Україні відсутній державний стандарт на обрушене насіння конопель. Технічні умови ТУ У 10.3-16304966-412:2015 “Насіння коноплі та продукти його переробки” мають такий асортимент: “насіння коноплі”, “насіння коноплі

подрібнене” та “висівки конопляні”; розповсюджуються тільки для сортів ЮСО-31, Безнаркотичний, Гляна, Золотоніський 15, Зоряна. Що стосується якості та безпечності продуктів, то ТУ містять виключно таку інформацію: органолептичні показники якості; вміст вологи, сміттєвих домішок, важких металів та мікотоксинів; зараженість шкідниками.

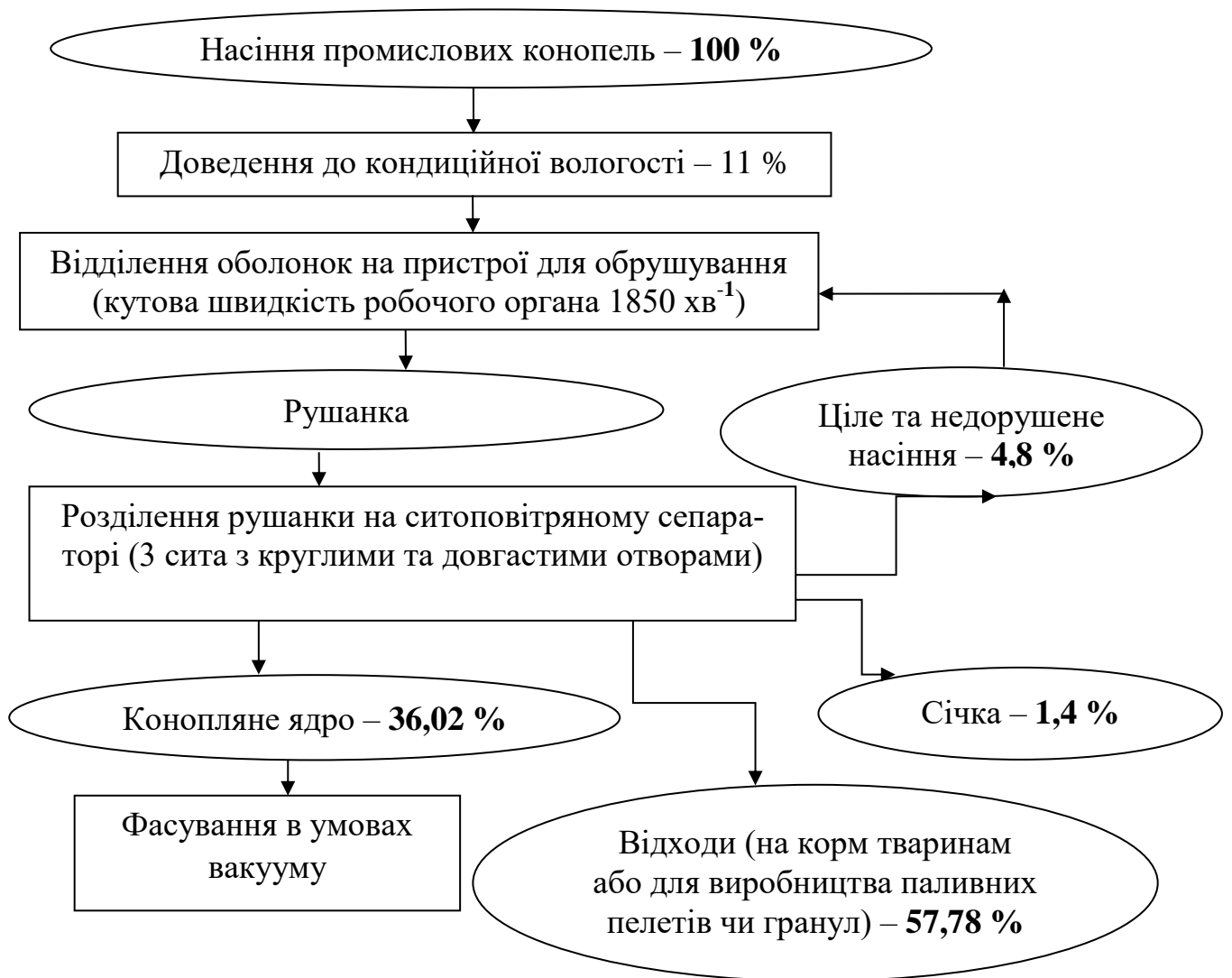


Рис. 7.8. Структурна схема виробництва обрушеного насіння конопель





Рис. 7.9. Зовнішній вигляд руشانки

Компанія HempFlax (Нідерланди) пропонує дані досліджень складу та властивостей обрешеного насіння конопель сортів, районованих у Нідерландах та Румунії (<https://www.hempflax.com>). Цю інформацію було використано для порівняльного аналізу.

Для досліджень використовували насіння конопель сорту Глесія, характеристика якого наведена в п.п. 7.3.1 (зразок № 2). Органолептичні показники конопляного ядра:

- зовнішній вигляд та колір – половинки та частинки ядер білого або світло-бежевого кольору, половинки та частинки ядер з насінневими оболонками зеленого кольору;
- запах та смак – горіховий, характерний для здорового насіння конопель, вільний від стороннього присмаку та запаху.

Результати визначення фізико-хімічних показників якості конопляного ядра є цінною інформацією для переробників конопляного насіння української селекції (табл. 7.18).

Таблиця 7.18. Характеристика фізико-хімічних показників якості конопляного ядра

Показник	Значення показника			
	за даними дослідження		за ТУ У 10.3-16304966-412:2015	за даними HempFlax
	конопляне ядро	вихідне насіння		
1	2	3	4	5
Масова частка вологи, %	7,01	8,38	не більше 16,00	не більше 7,00
Масова частка сміттєвих домішок, %	0,36	3,32	не більше 5,00	-
Кислотне число, мг КОН/г	3,10	3,30	-	-
Вміст шкідників	не виявлено	не виявлено	не дозволено, крім ураженості кліщем не вище II ступеня	-
Масова частка олії, %*	54,02	33,33	-	48,00
Масова частка золи, %*	6,47	5,91	-	-
Масова частка клітковини, %*	5,45	32,25	-	6,00
Масова частка протеїну, %*	32,78	22,54	-	34,00
Масова частка мінеральних речовин*:				
фосфор, г/кг	13,48	8,90		13,82
кальцій г/кг	0,54	0,86		0,004
магній, г/кг	2,73	2,42		5,57
ферум, мг/кг	94,10	74,71	-	76,00
цинк, мг/кг	111,78	56,08		85,00
кобальт, мг/кг	1,00	0,52		-
манган, мг/кг	38,34	59,38		57,00
купрум, мг/кг	12,56	не визначали		9,00

Примітка. \* – у перерахунку на суху речовину.

### Представлені дані

З метою попередження харчових отруєнь людини (харчової інтоксикації) обов'язковим при оцінці безпечності харчових продуктів є визначення їх мікробіологічного стану (Олексієнко Н. та ін., 2011). Ураховуючи це, а також той факт, що конопляне ядро під час виробництва не підлягає термічній обробці, було досліджено його мікробіологічні показники якості (табл. 7.19).

Таблиця 7.19. Результати визначення мікробіологічних показників якості конопляного ядра

Показник	Значення показника		
	дані дослідження	за ТУ У 10.3-16304966-412:2015	дані Немр-Flax
Бактерії групи кишкових паличок (коліформи), г	не виявлено	-	< 20 КУО/г
Плісняві гриби, КУО*/г	< 10	-	< 2·10 <sup>4</sup>
Дріжджі, КУО*/г	< 10	-	
Патогенні мікроорганізми, у тому числі роду <i>Salmonella</i> , в 25 г	не виявлено	-	відсутній в 25 г

*Примітка.* \* – колонієутворювальні одиниці.

Аналізуючи одержані дані, можна зробити висновок, що мікробіологічні показники якості конопляного ядра знаходяться в нормі. Важливим є дотримання умов зберігання конопляного ядра для уникнення розвитку патогенної мікрофлори, яка може розвинути в білкових складових насіння, не захищеного оболонкою, при підвищенні вологості та температури. З метою попередження виникнення патогенної мікрофлори рекомендується фасувати конопляне ядро в умовах вакууму (рис. 7.10).



Рис. 7.10. Вакуум-пакувальна машина

За ТУ У10.3-16304966-412:2015 “Насіння коноплі та продукти його переробки” амінокислотний склад не визначається, але насіння конопель має унікальний вміст усіх незамінних амінокислот, тому цей показник було досліджено (табл. 7.20). Дані підтверджують, що насіння конопель належить до “суперфудів”, оскільки містить незамінні амінокислоти. Очевидним є й те, що процес обробування підвищує біологічну цінність насіння конопель як харчового продукту за рахунок відокремлення малоцінних оболонок.

Таблиця 7.20. Амінокислотний склад конопляного ядра

Амінокислота	“з” чи “нз”*	Вміст амінокислоти				
		у конопляному ядрі		у вихідному насінні		за даними HempFlax, мг/100 г
		мг/100 г	%	мг/100 г	%	
Аланін	“з”	1145	5,38	642	5,52	1760
Аргінін	“з”	2925	13,73	1409	12,11	3420
Аспаргінова кислота	“з”	1844	8,56	1100	9,45	1870
Валін	“нз”	667	3,13	351	3,02	1880
Гістидин	“з”	660	3,10	326	2,80	860
Гліцин	“з”	1090	5,12	644	5,54	1420
Глутамінова кислота	“з”	3910	18,35	2370	20,37	6340
Ізолейцин	“нз”	587	2,75	323	2,78	1320
Лейцин	“нз”	1426	6,69	791	6,79	2000
Лізін	“нз”	1084	5,09	661	5,68	960
Метіонін	“нз”	618	2,90	263	2,26	770
Пролін	“з”	994	4,67	593	5,09	-
Серин	“з”	1331	6,25	565	5,64	1850
Тирозин	“з”	846	3,97	383	3,29	1670
Треонін	“нз”	769	3,61	438	3,77	1580
Триптофан	“нз”	Не визначали				210
Фенілаланін	“нз”	984	4,62	525	4,51	1740
Цистеїн	“нз”	426	2,00	163	1,40	1570
Всього:		21306	100,00	11639	100,00	30220

Примітка. \* “з” – замінна амінокислота; “нз” – незамінна амінокислота.

## 7.5. Параметри процесу вилучення олії з насіння промислових конопель

Насіння промислових конопель має унікальний склад не тільки за вмістом амінокислот, а й жирних кислот. Цінні Омега-3, Омега-6 та їх ізомери мають унікальну концентрацію в конопляній олії серед інших рослинних олій. Воче-

видь цей продукт із насіння конопель характеризується широким попитом.

Проведено аналіз технологічного процесу виробництва конопляної олії в Україні, який виконується тільки пресуванням з метою збереження її біологічної активності та корисних нативних властивостей. Дослідження проводили на базі ТОВ “Десналенд” та ІЛК НААН. Відібрано два зразки конопляної олії:

– № 1 – олія, одержана на шнековому пресі ПШ 250 (рис. 7.11) в ІЛК НААН;

– № 2 – олія, одержана на шнековому пресі ММШ-60 (рис. 7.12) в ТОВ “Денсаленд”.

У дослідженні використовували насіння конопель сорту Глесія, характеристика якого наведена в п.п. 7.3.1 (зразок № 1).

Виробництво конопляної олії відбувалося в такий спосіб: зважене насіння конопель засипали в прес, в якому віджимали олію за допомогою шнека. Олію та макуху збирали в окремі ємкості. Олію фільтрували, а макуху передавали на подальшу переробку. Фільтрат направляли на технічні потреби.

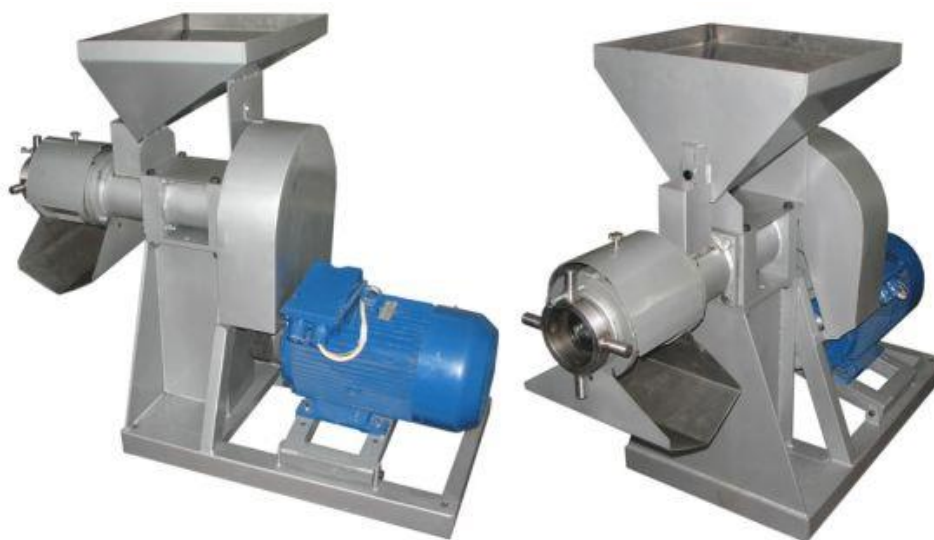


Рис. 7.11. Загальний вигляд шнекового преса ПШ 250



Рис. 7.12. Загальний вигляд шнекового преса ММШ-60

Обидва преси мають однаковий принцип дії. Сировину рівномірно подають у приймальний патрубок, далі вона надходить в зеєрну камеру. У робочій секції преса на сировину діє шнековий вал, завдяки чому відбувається віджимання і вилучення рідкої фракції з насіння – олії. Дно і стінки зеєрного відсіку мають невеликі зазори, через які олія стікає в накопичувальну ємність, що знаходиться знизу, а макуха виходить пелюстками наприкінці горизонтальної робочої зони. Спостерігалися відмінності між двома пресами в температурі процесу та у виході олії (табл. 21).

Прес шнековий олійний ПШ 250 призначений для безперервного холодного віджимання олій із насіння олійних культур за технологіями, які виключають попереднє подрібнення та кондиціонування насіння. Конструкція шнека, шнекової камери і зеєрного циліндра дозволяє одержати оптимальні температурні та барометричні умови для пресування олійної сировини, забезпечує високий ступінь віджимання.

Шнековий прес ММШ-60 призначений для холодного пресування, його продуктивність становить 60 кг/год. Даний прес подвійного віджимання використовують для дрібнонасієних культур. Температура олії (~48 °С) на виході дозволяє зберігати корисні властивості олії. Після пресування одержують нефільтровану конопляну олію, яку далі подають на лінію фільтрації, та конопляну

макуху, з якої виробляють борошно, клітковину, протеїновий порошок та комбікори.

Виробництво конопляної олії відрізняється від виробництва інших рослинних олій тим, що стадія “підготовка сировини” перед пресуванням відсутня. Перед завантаженням у шнек насіння конопель не підлягає гідротермічній обробці та не потребує очищення від оболонок, але має відповідати вимогам за вологістю та чистотою ДСТУ 7695:2015 “Насіння конопель. Технічні умови” для насіння, яке закладається на зберігання.

Наступною стадією після пресування насіння конопель є фільтрування конопляної олії. Для обох зразків олії цей процес здійснювали методом седиментаційного фільтрування (рис. 7.13). 20 л олії завантажували в рукава з фільтрувальної тканини габардин, які мали висоту 75 см та площу фільтрування 0,94 м<sup>2</sup>; їх підвішували над накопичувальними ємкостями. Час фільтрування – 24 год.



Рис. 7.13. Рукавні фільтри

Недоліком даного способу фільтрування є безпосередній контакт конопляної олії з повітрям, що збільшує ризики окиснення готового продукту. Тому на підприємстві ТОВ “Десналенд” (при партії конопляної олії від 200 л) вико-

ристовують лінію фільтрації, яка призначена для фільтрування рослинної олії та забезпечує її очищення від механічних домішок, важких жирів та парафінів. Лінія складається із фільтра з фільтруючими елементами, піддона, в який встановлюється фільтр, ємкості для неочищеної олії, компресора. Лінія фільтрації призначена для тонкого очищення за температури навколишнього середовища від 10 до 40 °С та вологості повітря не вище 87 %. Принцип роботи полягає в примусовій подачі неочищеної олії під певним тиском повітря з ємкості у фільтр для проходження її крізь фільтруючі елементи з бельтинг-тканини, яка має високі фільтруючі властивості завдяки своїй щільності, властивостям волокна та специфічному їх розміщенню з метою очищення. Далі очищену олію подають на розфасування в пляшки. Для укупорювання пляшок використовують машину DDX-500.

Узагальнення технологічних параметрів згаданих процесів виробництва конопляної олії представлено в табл. 7.21.

Таблиця 7.21. Порівняльна характеристика технологічних стадій виробництва конопляної олії

Показник	Технологія	
	ІЛК НААН	ТОВ “Десналенд”
Продуктивність, кг/год	150	60
Вихід нефільтрованої олії, %	22,8–24,2	29,7
Температура олії на виході, °С	32–55	48,0
Вихід макухи, %	50,1–66,67	66,00
Температура макухи, °С	45,0	48,0
Вологість макухи, %	7,48	7,37
Олійність макухи, %	12,25	12,20
Час фільтрування, год	24	48
Вихід фільтрованої олії, %	14,6–16,7	19,7
Виробничі втрати, %	2,0–2,2	4,3

Виробничими втратами при пресуванні і фільтруванні є налипання на робочі органи та на фільтрувальну тканину, на ємкості, в які збирають олію і відходи.



### 7.5.1. Показники якості пресової конопляної олії

Для встановлення впливу параметрів технологічного процесу на якість олії було проведено її сенсорний аналіз (табл. 7.22) та визначено фізико-хімічні характеристики (табл. 7.23) олії № 1, одержаної на пресі ПШ 250, модернізованому в ІЛК НААН, і олії № 2 – на пресі ММШ-60 в ТОВ “Десналенд”.

На момент проведення досліджень нового державного стандарту на конопляну олію не існувало (згідно з даними Українського науково-дослідного інституту олій та жирів Національної академії аграрних наук, м. Харків), а ГОСТ 8989-73 “Олія конопляна. Технічні умови” втратив свою чинність, тому для порівняння результатів досліджень використовували дані ТУ У10.4-3922410-001:2017 для нерафінованої конопляної олії першого гатунку.

Таблиця 7.22. Органолептичні показники якості зразків конопляної олії

Показник	Олія № 1	Олія № 2	За ТУ У10.4-3922410-001:2017
Прозорість	Над осадом прозора	Над осадом прозора	Над осадом прозора
Колір	Світло-зелений	Зелений	Зелений різної інтенсивності
Запах і смак	Властивий конопляній олії, без стороннього запаху, присмаку гіркоти	Властивий конопляній олії, без стороннього запаху, присмаку гіркоти	Властивий конопляній олії, без стороннього запаху, присмаку гіркоти

Використовуючи дані табл. 7.22, можна зробити висновок, що органолептичні показники проаналізованих зразків конопляної олії відповідають вимогам ТУ У10.4-3922410-001:2017 “Олії рослинні. Технічні умови”.

Олія № 2 має більш прийнятні показники якості, ніж олія № 1, що підтверджують дані табл. 7.23. Зменшені показники кислотного та пероксидного чисел олії № 2, порівняно з даними щодо олії № 1, свідчать про те, що технологічне обладнання, зокрема прес, може впливати на процеси окиснення складових насіння під час вилучення олії з нього. Ці відомості необхідно враховувати виробникам під час вибору обладнання.

Побічними продуктами виробництва конопляної олії є макуха та фільтрувальний осад. У результаті пресування одержали макуху, яка мала вигляд пе-

люсток сіро-коричневого кольору товщиною від 1,3 до 3,8 мм, виражений запах, властивий конопляній олії. Вологість макухи № 1 становила 7,48 %, макухи № 2 – 7,37 %; олійність (у перерахунку на сухі речовини) – 12,25 та 12,75 %, відповідно.

Таблиця 7.23. Характеристика показників якості зразків фільтрованої конопляної олії

Показник	Олія № 1	Олія № 2	За ТУ У10.4-3922410-001:2017
Кислотне число, мг КОН/г	2,60	1,60	Наприкінці строку зберігання – не більше 2,30
Пероксидне число, $\frac{1}{2}$ O ммоль/кг	14,34	8,61	Наприкінці строку зберігання – не більше 10,0
Йодне число, г/100 г	158,51	152,00	-
Вміст води та летких речовин, %	0,14	0,15	не більше 0,125
Вміст нежирових домішок, %	0,07	0,06	не більше 0,10
Вміст фосфоровмісних речовин, мг/кг у перерахунку на стеароолеолецитин, %	88,5	69,26	-
	0,23	0,18	не більше 0,26
Вміст загальної золи, %	0,05	0,05	-
Вміст вітамінів, мг/кг:			
А	78,0	82,0	-
Е,	562,8	582,2	-
у тому числі:			
$\alpha$ -токоферол	234,0	246,2	-
$\beta$ -токоферол+ $\gamma$ -токоферол	316,0	322,0	-
$\delta$ -токоферол	12,8	14,0	-

Після фільтрування олії у фільтрувальних рукавах залишився темно-зелений осад, який складався з дрібних частинок насіння, перемішаного зі залишками олії. Запах осаду – горіховий та більш насичений, ніж запах конопляної олії. Фізико-хімічні показники осаду № 1 та № 2, відповідно:

- вміст олії – 60,62 та 60,52 %;
- вологість – 4,35 та 4,32 %;
- вміст фосфоровмісних речовин – 6,26 та 6,29 %.

Що стосується зміни якості олії в процесі фільтрування, то було визначено показники кислотного та пероксидного чисел. Після фільтрування, яке відбувалося протягом доби, кислотне число збільшилося на 0,17 мг КОН/г, а перо-

кисдне число – на 0,92 ½ O ммоль/кг. Це свідчить про те, що конопляна олія чутлива до впливу кисню, тому й рекомендовано максимально уникати контакту її з повітрям у технологічному процесі.

### 7.5.2. Жирно-кислотний склад пресової конопляної олії

Для підтвердження даних із наукової літератури щодо оздоровчих властивостей конопляної олії було проведено її жирно-кислотний аналіз. Відомо, що лляна олія також має оздоровчі властивості за рахунок умісту ненасичених жирних кислот, що дало підстави провести їх порівняльний аналіз. Результати досліджень для кислот, вміст яких  $\leq 0,5\%$ , наведено в табл. 7.24.

Таблиця 7.24. Порівняльна характеристика жирно-кислотного складу олій

Жирна кислота	Вміст кислоти по відношенню до загальної кількості кислот, %		
	олія № 1	олія № 2	лляна олія
C 16:0 пальмітинова	5,718	6,256	5,567
C 18:0 стеаринова	3,035	3,193	5,402
C 18:1 олеїнова (Омега-9)	13,612	13,261	17,894
C 18:2 лінолева (Омега-6)	54,839	56,861	15,487
C 18:3 альфа-ліноленова (Омега-3)	18,541	15,991	55,251
C 18:2 гамма-ліноленова (Омега-6)	1,268	2,756	0,000
C 20:0 арахінова	2,367	0,794	0,239

Спосіб одержання конопляної олії з насіння сорту Глесія в умовах експерименту практично не впливав на її жирно-кислотний склад. Уміст основних жирних кислот в одержаній олії не відрізняється від даних опублікованої інформації щодо співвідношення в ній есенційних жирних кислот Омега-6 і Омега-3 як 3,0:1–3,6:1, тоді як в олії лляній – 1:3,5.

Конопляна олія містить  $\gamma$ -ліноленову кислоту, яка досить рідко трапляється в рослинній сировині, та унікальний вміст ненасичених жирних кислот порівняно з відомими оліями – табл. 7.25 (Осейко М. І., 2006; <https://uk.wikipedia.org>).

Ученими світу проведені дослідження, результати яких підтверджують необхідність ненасичених жирних кислот Омега-3, Омега-6 та Омега-9 для ор-

ганізму людини. Згідно з рекомендаціями ВООЗ ООН, людині потрібно від 1 до 3 г Омега-3 і 4 г Омега-6 жирних кислот у складі олій. Це досягається вживанням по 20±5 мл конопляної олії за добу.

Таблиця 7.25. Порівняльний вміст ненасичених жирних кислот в оліях

Олія	Вміст кислоти по відношенню до загальної кількості кислот, %		
	олеїнова (Омега-9)	лінолева (Омега-6)	ліноленова (Омега-3)
Конопляна*	13,3	56,9	16,0
Лляна	20,1	14,6	55,5
Соняшникова	54,1	12,5	0,0
Сафлорова	75,2	12,8	0,0
Кукурудзяна	56,4	0,4	1,1
Гарбузова	55,7	0,6	0,4
Кедрова	42,4	19,9	0,3
Соєва	21,7	54,1	0,6
Ріпакова	60,2	20,5	8,0
Гірчична	42,1	27,8	10,1
Олія із зародків пшениці	15,4	52,3	8,1
Горіхова	20,5	57,5	10,5
Рижієва	15,7	19,6	32,9
Оливкова	69,9	12,6	0,7
Коріандрова	66,1	17,2	0,6
Кокосова	7,8	1,7	0,0
Пальмова	38,6	9,9	0,0
Бавовняна	19,0	54,0	1,0
Арахісова	46,5	31,4	0,0
Олія авокадо	0,0	12,5	1,0
Олія каноли	61,8	18,6	9,1
Олія з виноградних кісточок	14,3	74,7	0,0

Примітка: \* – за даними досліджень.

На думку європейських експертів, мінімальна денна потреба в Омега-3 поліненасичених жирних кислотах у молоді й дорослих становить 1000–1500 мг і залежить від статі, віку та фізичної активності. Співвідношення Омега-6 до Омега-3 поліненасичених жирних кислот для лікувально-профілактичного харчування – від 3:1 до 5:1. За розрахунками А. П. Левицького, сьогодні змішаний

раціон пересічного українця має співвідношення 43,6:1,0, тобто перевищує допустимий рівень Омега-6 поліненасичених жирних кислот у 8,7 рази (Кричковська Л. та ін., 2010).

Дослідженнями доведено, що на якість готового продукту впливають умови пресування та фільтрування; з урахуванням цього було запропоновано структурну схему виробництва конопляної олії, яку зображено на рис. 7.14.



Рис. 7.14. Структурна схема виробництва олії конопляної

## 7.6. Показники якості сипких конопляних продуктів

Однією з проблем, що постала перед харчовою та переробною промисловістю України, є забезпечення населення високоякісними білковими й білково-ліпідними продуктами (Осейко М. І., 2006). До таких належить конопляне насіння.

У процесі переробки насіння промислових конопель на стадії вилучення з нього конопляної олії одержують макуху – унікальне джерело протеїну, натурального каротину, фітостеролів і фосфоліпідів, які здатні запобігти анемії; К, Zn, S та Mg зміцнюють серцевий м'яз та нервову систему. Макуха містить клітковину, яка необхідна для нормальної роботи шлунково-кишкового тракту; покращує моторику, виводить з організму шлаки; позитивно впливає на органи дихання, допомагає під час лікування захворювань серцево-судинної системи і ожиріння; покращує роботу нирок та печінки. Унікальність конопляної макухи полягає в тому, що вона містить достатню кількість повноцінного рослинного білка, оскільки насіння конопель належить до білково-олійних культур.

Шляхом тонкого подрібнення макухи та розділення одержаної маси на фракції, різні за розміром, виробляють сипкі конопляні продукти: протеїн, борошно та конопляні висівки (клітковину). Найдрібнішу фракцію, яка має найбільшу кількість білка, умовно називають “конопляний протеїн”, але вона містить і значну кількість жиру, золи та клітковини. Структурну схему цього процесу наведено на рис. 7.15.

Весь процес відбувається за кімнатної температури, одержані продукти термічній обробці не підлягають.

Сипкі конопляні продукти відрізняються між собою за складом та розміром частинок. Так, “конопляний протеїн” одержують проходом із сита 0,02 мм, сходом із цього сита є борошно, а конопляні висівки (клітковина) – сходом із сита 0,3 мм. Основна мета розділення подрібненої макухи на фракції полягає в максимальному виділенні в одну фракцію цінного рослинного конопляного білка.

Проведено дослідження органолептичних та фізико-хімічних показників якості борошна, клітковини та “конопляного протеїну”. Визначення показників якості сипких конопляних продуктів проводили згідно зі стандартними і галузевими методиками.

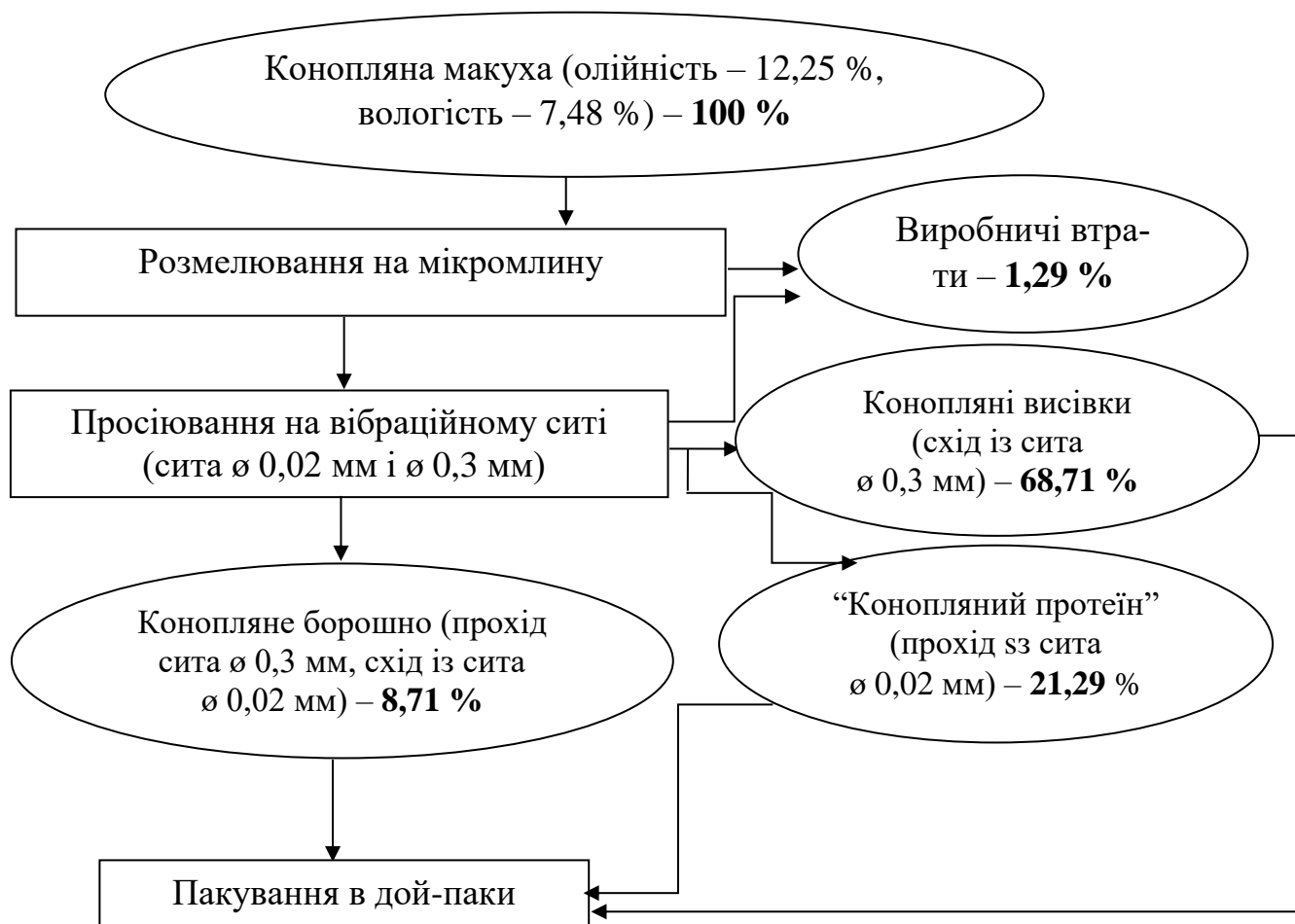


Рис. 7.15. Структурна схема виробництва сипких конопляних продуктів

Органолептичні показники якості конопляного борошна: колір темно-коричневий з відтінками зеленого; запах – властивий здоровому насінню конопель, без стороннього запаху; смак – властивий насінню конопель, без гіркоти, кислоти та інших сторонніх присмаків.

Колір “конопляного протеїну” – жовто-зелений; запах та смак чисті знеособлені, без сторонніх запахів та присмаків.

Загальний вигляд конопляних висівок (клітковини) – сухий сипкий продукт без щільних грудок; колір – темно-зелений; запах – властивий здоровому

насінню конопель, без сторонніх запахів.

За відсутності державних стандартів на сипкі конопляні продукти неможливо встановити відповідність їх якості нормативним показникам. Показники якості сипких конопляних продуктів порівнювали з даними ТУ У10.41-39224310-002:2017 “Борошно, висівки та протеїн з насіння олійних культур. Технічні умови” (табл. 7.26).

Таблиця 7.26. Характеристика фізико-хімічних показників якості сипких конопляних продуктів

Показник	Насіння конопель	“Конопляний протеїн”	Дані за ТУ У 10.41-39224310-002:2017	Борошно	Дані за ТУ У 10.41-39224310-002:2017	Висівки	Дані за ТУ У 10.41-39224310-002:2017
Масова частка вологи, %	8,36	7,00	не більше 7,00	6,50	не більше 9,00	7,17	не більше 15,00
Масова частка протеїну, %*	24,70	52,14	не менше 50,00	44,01	не менше 40,00	22,65	не менше 14,00
Масова частка олії, %*	33,62	15,68	не більше 16,00	11,65	не більше 12,00	10,62	-
Масова частка золи, %*	4,99	9,55	не більше 10,00	8,84	не більше 10,00	5,05	-
Масова частка клітковини, %*	36,85	5,51	не більше 7,0	13,88	не більше 15,0	44,94	не більше 45,0
Кислотне число, мг КОН/г	2,80	1,80	не більше 3,00	1,30	не більше 3,00	2,30	не більше 3,00
Інші сторонні домішки, %	1,37	0,00	не дозволено	0,00	не дозволено	0,00	не дозволено
Зараженість шкідниками, %	0,00	0,00	не дозволено	0,00	не дозволено	0,00	не дозволено

Примітка. \* – у перерахунку на сухі речовини.

Фракція “конопляний протеїн” багата на вміст протеїну, олії, мінеральних речовин, що робить її найбільш цінною для вживання серед представлених сипких продуктів (табл.7.26)

Уміст мінеральних речовин у сипких конопляних продуктах наведено в табл. 7.27.



Таблиця 7.27. Вміст мінеральних речовин у сипких конопляних продуктах

Показник	Насіння конопель	“Конопляний протеїн”	Борошно	Висівки
Фосфор, г/кг	8,35	15,45	19,47	6,96
Кальцій, г/кг	0,82	2,15	2,18	1,45
Магній, г/кг	2,57	4,02	3,73	1,89
Ферум, мг/кг	87,68	130,26	173,23	84,09
Цинк, мг/кг	58,16	192,63	182,04	55,89
Кобальт, мг/кг	0,51	1,49	1,29	0,72
Манган, мг/кг	69,51	105,29	95,09	72,64
Купрум, мг/кг	не визначали	22,52	18,65	13,43

Аналіз даних, наведених у таблицях 7.26 та 7.27, показує значну подібність за окремими хімічними показниками між конопляним борошном і “конопляним протеїном”, зокрема, за вмістом золи та досліджених мінеральних елементів; він виявився у 2–10 разів вищим, ніж у крупи гречаної, що вважається однією з культур, які мають найбільшу поживну цінність (Єфімов В. Г. та ін., 2017).

Відповідно до наукових літературних даних насіння конопель має унікальний білковий склад, тому нами проведено визначення амінокислотного складу (табл. 7.28) сипких продуктів з насіння промислових конопель.

До незамінних амінокислот належать Валін, Ізолейцин, Лейцин, Лізин, Метіонін, Треонін, Триптофан, Фенілаланін. Усі вони присутні в насінні конопель та сипких конопляних продуктах. Для порівняння наведемо вміст незамінних амінокислот у гречаній крупі (мг/100 г): Валін – 690, Ізолейцин – 520, Лейцин – 680, Лізин – 630, Метіонін – 260, Треонін – 500, Триптофан – 180, Фенілаланін – 540. Підтверджено, що конопляні продукти мають високу біологічну цінність, яка в “конопляного протеїну” становить 81,7 %.

Оскільки при виробництві сипких конопляних продуктів не застосовують термообробку, то важливим було підтвердити відсутність патогенної мікрофлори (табл. 7.29). Періодичність мікробіологічного контролю має бути погоджена з місцевими органами Держсаннагляду і гарантувати епідеміологічну безпеч-

ність продукції.

Таблиця 7.28. Уміст амінокислот у конопляних сипких продуктах, мг/100 г

Показник	Насіння конопель	“Конопляний протеїн”	Борошно	Клітковина
Аланін	735	1556	1462	671
Аргінін	1647	3589	3411	1336
Аспаргінова кислота	1359	2263	2224	1286
<b>Валін</b>	445	885	910	371
Гістидин	413	870	806	335
Гліцин	740	1272	1319	717
Глутамінова кислота	2870	4445	4625	2593
<b>Ізолейцин</b>	374	782	813	331
<b>Лейцин</b>	913	1951	1877	813
<b>Лізин</b>	788	1458	1300	843
<b>Метіонін</b>	302	686	630	184
Пролін	673	1358	1305	604
Серин	824	1597	1514	725
Тирозин	469	1078	955	376
<b>Треонін</b>	555	1056	1029	485
<b>Фенілаланін</b>	653	1350	1271	570
Цистеїн	197	594	545	160

Таблиця 7.29. Мікробіологічні показники якості сипких конопляних продуктів

Показник	“Конопляний протеїн”	Борошно	Висівки
Бактерії групи кишкових паличок (колі-форми), 0,1 г	не виявлено	не виявлено	не виявлено
Плісняві гриби, КУО/г	<10	<10	<10
Дріжджі, КУО/г	<10	<10	<10
Патогенні мікроорганізми, у тому числі роду Salmonella, в 25 г	не виявлено	не виявлено	не виявлено

### **7.7. Розробка технологічної схеми комплексної переробки насіння промислових конопель**

На підставі виконаних досліджень та теоретичних узагальнень одержаних результатів розроблено апаратурно-технологічну схему комплексної переробки насіння промислових конопель (рис. 7.16).

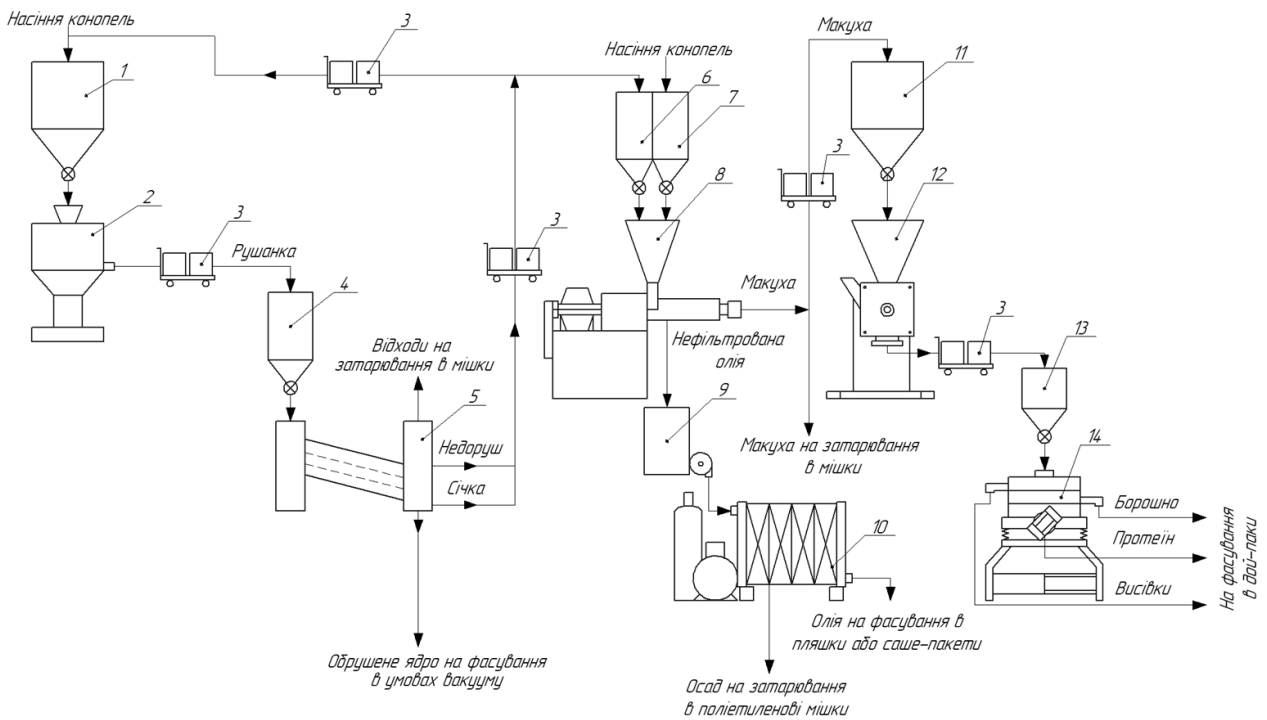


Рис. 7.16. Технологічна схема комплексної переробки насіння промислових конопель:

1, 4, 6, 7, 11, 13 – накопичувальні бункери, оснащені дозаторами; 2 – пристрій для обрушування; 3 – рухома платформа з ємкостями; 5 – повітряно-ситовий сепаратор; 8 – шнековий прес; 9 – ємкість з насосом; 10 – фільтр-прес; 12 – мікромлин; 14 – вібраційне сито

Комплексна переробка насіння промислових конопель складається з двох основних технологічних стадій: обрушування насіння конопель, виробництва конопляної олії та сипких конопляних продуктів. Ці технологічні процеси можуть бути як послідовними, так і паралельними, що залежить від потреб виробництва. У схемі передбачено виробництво тільки конопляного ядра або тільки олії та макухи, або олії та сипких конопляних продуктів.

Технологічна лінія комплексної переробки насіння промислових конопель умовно поділяється на три блоки:

- обрушування насіння конопель, основними вузлами якого є пристрій для обрушування та повітряно-ситовий сепаратор;

- пресування насіння конопель, основними вузлами якого є шнековий прес та фільтр-прес;
- переробка макухи, основними вузлами блока є мікромлин та вібраційне сито.

Технологічний процес комплексної переробки насіння промислових конопель починається з блока обрушування. Насіння конопель зі складу завантажують у накопичувальний бункер 1, оснащений дозатором, з якого його далі дозують у пристрій для обрушування 2, де під дією відцентрових сил та удару об деку відбувається відділення ядра насіння конопель від оболонки. Рушанка з вихідного патрубку пристрою для обрушування 2 збирається в лотку на рухомій платформі 3. Далі її завантажують у накопичувальний бункер 4, оснащений дозатором. Рушанку подають у повітряно-ситовий сепаратор 5, в якому за допомогою коливальних рухів та дії повітря відбувається розділення рушанки на фракції: обрушене ядро, недоручене та ціле насіння, січку, відходи. Кожну фракцію збирають в окрему ємкість. Обрушене ядро подають на пакування у вакуум-пакувальну машину. Ціле та недоручене насіння разом із січкою – на виробництво олії в накопичувальний бункер 6 над пресом 8 або тільки недоручене та ціле насіння повторно на обрушування в накопичувальний бункер 1, відходи (насіннева і плодова оболонка, пил, органічні домішки) пакують у мішки та реалізують на корм тваринам або на виробництво паливних пелетів чи гранул.

Другим блоком комплексної переробки насіння промислових конопель є процес його пресування. Насіння зі складу подають у накопичувальний бункер 7, з якого дозують у шнековий прес 8 подвійного віджимання, де відбувається відтискання олії. Нефільтровану олію збирають в ємкість з насосом 9, з якої її подають у фільтр-прес 10. Відфільтровану олію направляють на розфасування в пляшки або саше-пакети. Макуху збирають в ємкість на рухомій платформі 3 і направляють у накопичувальний бункер 11 над мікромлином 12 або пакують у мішки та реалізують на корм тваринам. Осад із фільтра-преса 10 збирають в ємкість, далі пакують у поліетиленові мішки.

Третім блоком комплексної переробки насіння промислових конопель є виробництво сипких конопляних продуктів із макухи. Із накопичувального бункера 11 макуха надходить у мікромлин 12, де під дією удару молотків подрібнюється. Продукти розмелу через калібрувальну ґратку, зсипають у тканинний мішок, закріплений на вихідній горловині помельної камери. Мішок з продуктами розмелу за допомогою рухомої платформи направляють у накопичувальний бункер 13, далі їх дозують у вібраційне сито 14, в якому відбувається розділення суміші на сипкі конопляні продукти: “конопляний протеїн”, борошно та висівки (клітковину). Отримані продукти подають на пакування в дой-паки із зіп-замком.

Усі машини мають бути оснащені магнітним захистом. Для підприємства такої потужності операції розвантаження і завантаження проводять вручну за допомогою рухомих платформ з ємкостями. Виробники обладнання, запропонованого в технологічній схемі, гарантують уловлювання пилу, достатнє для того, щоб не встановлювати на підприємстві систему аспіраційного очищення повітря (табл. 7.30).

Таблиця 7.30. Технічна характеристика обладнання

№ з/п	Обладнання	Кількість одиниць	Продуктивність	Потужність, кВт
1.	Накопичувальний бункер	1	$V = 0,05 \text{ м}^3$	-
2.	Пристрій для обрушування	1	$Q = 14 \text{ кг/год}$	0,3
3.	Рухома платформа з ємкостями	3	$V = 0,05 \text{ м}^3$	-
4.	Накопичувальний бункер	1	$V = 0,1 \text{ м}^3$	-
5.	Повітряно-ситовий сепаратор	1	$Q = 60 \text{ кг/год}$	0,37
6.	Накопичувальний бункер	1	$V = 0,05 \text{ м}^3$	-
7.	Накопичувальний бункер	1	$V = 0,2 \text{ м}^3$	-
8.	Шнековий прес	1	$Q = 60 \text{ кг/год}$	7,5
9.	Ємкість з насосом	1	$Q = 1000 \text{ л/год}$	2,2
10.	Фільтр-прес	1	$Q = 70 \text{ л/год}$	-
11.	Накопичувальний бункер	1	$V = 0,15 \text{ м}^3$	-
12.	Мікромлин	1	$Q = 100 \text{ кг/год}$	7,5
13.	Накопичувальний бункер	1	$V = 0,15 \text{ м}^3$	-
14.	Вібраційне сито	1	$Q = 600 \text{ кг/год}$	1,0
15.	Вакуум-пакувальна машина	1	$Q = 60 \text{ кг/год}$	8,0
16.	Пакувальна машина для пакування в саше	1	$Q = 36 \text{ л/год}$	0,4
17.	Пакувальна машина для пакування в дой-паки	1	$Q = 60 \text{ кг/год}$	8,0

Для збільшення продуктивності виробництва конопляного ядра можна запропонувати машину для обрешування LG-5 (Китай) – рис. 7.17.



Рис. 7.17 Машина для обрешування LG-5

За розробленою технологічною схемою комплексної переробки насіння промислових конопель одержано такі готові конопляні продукти: ядро, олія, “конопляний протеїн”, борошно, висівки (клітковина). Готову продукцію можна використовувати як самостійні харчові продукти, так і у вигляді інгредієнтів у харчових технологіях.

## 7.8. Висновки

На підставі аналізу науково-технічних та патентних джерел інформації, узагальнення теоретичних та експериментальних досліджень сформульовано висновки.

1. Одержані дані щодо органолептичних, фізико-хімічних, мікробіологічних показників якості, показників безпеки, жирно-кислотного, амінокислотного, мінерального складу насіння промислових конопель сортів Глесія і Гляна та

продуктів його переробки. Дані досліджень узгоджуються з інформацією наукових літературних джерел, що насіння конопель є “суперфуд”.

2. Визначено вплив технологічних параметрів обрешування насіння конопель на вихід і чистоту готового продукту – ядра. Розроблено математичні моделі цього процесу. Найбільший вихід ядра (37 %) досягли за початкової вологості від 6,0 до 11,0 %, чистоти насіння конопель 99,0 %, а також частоти обертання робочого органа пристрою для обрешування –  $1850 \text{ хв}^{-1}$ . Максимальну чистоту готового продукту (99,0 %) одержано, якщо засміченість сировини становить 1,0 %, частота обертання робочого органа –  $1500\text{--}2500 \text{ хв}^{-1}$ . Попереднє фракціонування за розмірами насіння конопель має найменший вплив на чистоту ядра.

3. Проаналізовано процеси одержання конопляної олії з насіння сорту Глесія у виробничих умовах. Пресування та фільтрування олії мають параметри: вихід пресової нефільтрованої олії становить від 22,8 до 29,7 %; температура олії на виході з преса – від 32,0 до 55,0 °С; вихід макухи – від 50,1 до 66,0 %; температура макухи на виході – від 45,0 до 48,0 °С; олійність макухи –  $12 \pm 0,5$  %; вологість макухи –  $7 \pm 0,3$  %; час фільтрування 24–48 год; вихід фільтрованої олії – від 14,6 до 19,7 %; уміст олії в осаді на фільтрі – від 60,0 до 65,0 %; вологість осаду –  $4,0 \pm 0,2$  %, уміст фосфоровмісних речовин –  $6,0 \pm 0,3$  %; виробничі втрати – від 2,0 до 4,2 %. Визначено її органолептичні, фізико-хімічні показники якості та жирно-кислотний склад, а також співвідношення лінолевої до альфа-ліноленової кислоти – 3,0:1–3,6:1.

Згідно з рекомендаціями ВООЗ ООН людині потрібно від 1 до 3 г Омега-3 і 4 г Омега-6 жирних кислот у складі олії. Це досягається вживанням по  $20 \pm 5$  мл конопляної олії за добу. Вміст вітаміну А в конопляній олії становить 78 мг/кг, вітаміну Е (токоферолів) – 562,8 мг/кг.

4. Розроблено структурні схеми виробництва конопляних ядра, олії та сипких продуктів.

5. Виконано роботи з розробки технологічної схеми маловідходної комплексної переробки насіння промислових конопель, основними елементами якої

є обладнання для обривування та пресування насіння, розмелювання макухи та просіювання продуктів розмелу. Запропоновано технологію комплексної переробки насіння промислових конопель, яку рекомендовано до застосування в агропромисловому секторі та в харчовій промисловості.



## БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

**Abdulsudi Issa-Zachariaa, Yoshinori Kamitanic, Nami Miwac, Happiness Muhimbulab, Koichi Iwasakic** (2011). Application of slightly acidic electrolyzed water as a potential non-thermal food sanitizer for decontamination of fresh ready-to-eat vegetables and sprouts. *Food Control*. Vol. 22. Iss. 3–4. P. 601–607.

**Anwar F., Latif S., Ashraf M.** Analytical characterization of hemp (*Cannabis sativa*) seed oil from different agro-ecological zones of Pakistan. *Journal of the American Oil Chemists Society*. 2006. Vol. 83 (4). P. 323–329.

**Boyarchuk K.A., Karelin A.V.** (1997). BRAS Physics/Supplement. *Physics of Vibrations*. V. 61. № 4. P. 249.

**Bressani R.** Effects of processing of the nutritional qualities and functional properties of amaranth // *Amaranth: Perspectives on Production Processing and Marketing: Proc. 4th Nat. Amaranth Symp.*, 2325 Aug. 1990. St. Paul, MN: Minnesota Extension Service, University of Minnesota, 1990. P. 151-162.

**Capitelli M., Ferreira C.M., Gordiets B.F., Osipov A.I.** (2000). *Plasma Kinetics in Atmospheric Gases*. Springer. Berlin. N.-Y.. London. Paris. Tokyo. P. 334.

**Carlos A Martínez-Huitle, Enric Brillas** (2008). Electrochemical alternatives for drinking water disinfection. *Angewandte Chemie International Edition*. Vol. 47. Iss. 11. P. 1998–2005

**Frank A. Manthey, Saujanya R. Yalla, Todd J. Dick Mohammad Badaruddin** (2007). Extrusion Properties and Cooking Quality of Spaghetti Containing Buckwheat Bran Flour. *Society of Chemical Industry*. pp. 4–13. [doi:10.1111/ijfs.12641](https://doi.org/10.1111/ijfs.12641)

**Gallegos-Infante J.A., Rocha-Guzman N.E., Gonzalez-Laredo R.F., Ochoa-Martínez L.A., Corzo N., Bello-Perez L.A., Medina-Torres L., Peralta-Alvarez L.E.** (2010). Quality of spaghetti pasta containing Mexican common bean flour (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Chemistry*. Vol. 119. Issue 4. pp. 1544–1549. [doi: 10.1016/j.foodchem.2009.09.040](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.09.040)

**Honcharova O.V.** (2015). Elevage écologiquement intensif et techniques numériques rechercher le bien-être des animaux. Materials Les conférences du SPACE 2015. France. Rennes. P. 25–31.

Identification of patterns in the production of a biologically-active component for food products / **O. Kovaliova, Yu. Tchursinov, V. Kalyna, V. Koshulko, E. Kunitsia, A. Chernukha, O. Bezuglov, O. Bogatov, D. Polkovnychenko, N. Grigorenko** // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2/11 (104) 2020. P.61-68. DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2020.200026>.

**Jennifer E. Pelletier, Melissa N. Laska, Dianne Neumark-Sztainer, Mary Story** (2013). Positive attitudes toward organic, local, and sustainable foods are associated with higher dietary quality among young adults. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*. Vol. 113. № 1. P. 127–132.

**Kalyna V.S., Lutsenko M.V., Tchoursinov Y.O., Kunitsa K.V., Kharytonov M.M.** (2020), Approbation and biomedical research of “Coriander Petrozeline”. Scientific Study & Research Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry. 21 (2), pp. 155-162. <http://dspace.dsau.dp.ua/jspui/handle/123456789/2846>

**Kohler G.O., Edwards R.H. et al.** Commercialization of the Pro-Xan Process for the Production of Leaf Protein Concentrate. Report presented of the North American Chemical Congress, Las Vegas, USA, 1980.

**Korotkov, K.G., Matravers P., Orlov D.V.** (2010). Application of electrophoton capture (EPC) analysis based on gas discharge visualization (GDV) technique in medicine: a systematic review. *Journal of alternative and complementary medicine*. Vol. 16. № 1. P. 13–25

**Lan Y., Zha F., Peckrul A., Hanson B., Johnson B., Rao J., Chen B.** Genotype x Environmental Effects on Yielding Ability and Seed Chemical Composition of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) Varieties Grown in North Dakota. *Journal of the American Oil Chemists Society*. 2019. Vol. 96 (12). P. 1417–1425.

**Lee W.M.** (1991). Metal/Water chemical reaction coupled pulsed electrical discharge. *J. Phys.* V. 69. № 10. P. 6945–6951.

**Levanova A. V., Isaikina O. Ya., Lunina V. V.** (2016). Enthalpies of the Formation and Decomposition of Hydrogen Trioxide HOOOH in an Aqueous Solution. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. Vol. 90. № 11. P. 2136–2141.

**Malik M.A.** (2010). Water purification by plasmas: which reactors are most energy efficient? *Plasma chemistry and plasma processing*. Vol. 30. Iss. 21. P. 21–31.

**Mary Garvey, Jennifer Hayes, Eoghan Clifford, Neil Rowan** (2013). Ecotoxicological assessment of pulsed ultraviolet light-treated water containing microbial species and *Cryptosporidium parvum* using a microbiotest test battery. *Water and Environment Journal*. Vol. 29. Iss. 1. P. 27–35.

**Mihoc M., Pop G., Alexa E., Dem D., Militaru A.** Microelements Distribution in Whole Hempseeds (*Cannabis Sativa L.*) and in Their Fractions, *Revista De Chimie*. 2013. Vol. 64 (7). P. 776–780.

**Mihoc M., Pop G., Alexa E., Radulov I.** Nutritive quality of romanian hemp varieties (*Cannabis sativa L.*) with special focus on oil and metal contents of seeds. *Chemistry Central Journal*. 2012. Vol. 6. P. 1–12.

**Misra N.N., Tiwari B.K., Raghavarao K.S.M.S., Cullen P. J.** (2011). Nonthermal plasma inactivation of food-borne pathogens. *Food Engineering Reviews*. Vol. 3. №3. P. 159–170.

**Morgalev Yu.N., Khoch N.S., Morgaleva T.G., Gulik E.S., Borilo G.A., Bulatova U.A., Morgalev S.Yu., Ponyavina E.V.** (2010). Biotesting nanomaterials: Transmissibility of nanoparticles into a food chain. *Nanotechnologies in Russia*. Vol. 5. Iss. 11. P. 851–856.

**Murielle Naïtali, Georges Kamgang-Youbi, Jean-Marie Herry, Marie-Noëlle Bellon-Fontaine, Jean-Louis Brisset** (2010). Combined effects of long-living chemical species during microbial inactivation using atmospheric plasma-treated water. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 76. № 22. P. 7662–7664.

**Mykolenko S., Stepanskiy D., Tishenko A., Pivovarov O.** (2014). Investigation of the effect of water exposed to nonequilibrium contact plasma onto *Saccharomyces cerevisiae* yeast. *Ukrainian Food Journal*. Vol. 3. Iss. 2. P. 218–227.

**Oseyko M., Sova N., Chornei K.** Substantiation of Hemp Seeds Storage and Processing Technologies for Functional, Dietary and Specialty Products in Review. *Ukrainian Food Journal*. 2021. P. 41. (Препринт. *Ukrainian Food Journal*).

**Oseyko M., Sova N., Lutsenko M., Kalyna V.** Chemical aspects of the composition of industrial hemp seed products. *Ukrainian Food Journal*. 2019. Vol. 8 (3). P. 544–559.

**Pivovarov A. A., Kravchenko A. V., Tishchenko A. P., Nikolenko N. V., Sergeeva O. V., Vorob'eva M. I., Treshchuk S. V.** (2015). Contact nonequilibrium plasma as a tool for treatment of water and aqueous solutions: Theory and practice. *Russian Journal of General Chemistry*. Vol. 85. Iss. 5. P. 1339–1350.

**Pivovarov A.A., Tishchenko A.P., Kovalyova E.S.** (2011). Ecological aspects of development of food industry enterprises of Ukraine. NATO ARW “Environmental and food security and safety in Southeast Europe and Ukraine”. Dnipropetrovs'k. P. 28–29.

**Ruban, S., Borshch, O. O., Borshch, O. V., Orischuk, O., Balatskiy, Y., Fedorchenko, M., Kachan, A., Zlochevskiy, M.** The impact of high temperatures on respiration rate, breathing condition and productivity of dairy cows in different production systems. *Animal Science Papers & Reports*, 2020, 38.1. URL: <http://a192.fsi.pl/.../str61-72.pdf>

**Schoenlechner R., Drausinger J., Ottenschlaeger V., Jurackova K., Berghofer E.** (2010). Functional Properties of Gluten-Free Pasta Produced from Amaranth, Quinoa and Buckwheat. *Plant Foods for Human Nutrition*. Vol. 65. Issue 4. pp. 339–349. doi: [10.1007/s11130-010-0194-0](https://doi.org/10.1007/s11130-010-0194-0)

**Shewry P. R., Napier J. A., Tatham A. S.** Seed Storage Proteins: Structures and Biosynthesis. *The Plant Cell*. 2000. Vol. 7. P. 945–956.

**Shields R.J.** (2001). Larviculture of marine finfish in Europe. *Aquaculture*. Vol. 200. Iss. 1–2. P. 55–88.

**Stahman M.A.** The Wisconsin work. Twelfth technical alfalfa conference proceedings. Held now. 6 7, 1974, p. 92-98. American Dehydrators Association, 1975.

**Tchernov I.A.** The potential of *Amaranthus L.* and the problem of leaf protein // Greenvegetation fractionation: Proc. of the Fifth Intern. Congress on Leaf Protein Research “LEAFPRO-96”. Rostov-on-Don (Russia), 1996. V. 3. P. 44-50.

**Vainshelboim A.L., Hayes M.T., Korotkov K.G., Momoh K.S.** (2005). GDV Technology Applications for Cosmetic Sciences. IEEE 18th Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS 2005). Dublin.

**Volynets I.N., Beryugin A.A., Kochetov I.V., Marcheret S.O., Slovetsky D.** (1991). Mechanism of radicals generation and decay in D.C. glow discharge in CF<sub>4</sub>. Pisa. *Contrib. Papers*. V.1. P. 353–354.

**Vonapartis E., Aubin M.-P., Seguin P.** Seed composition of ten industrial hemp cultivars approved for production in Canada. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2015. Vol. 39. P. 8–12.

**Vonapartis E., Aubin M.-P., Seguin Ph., F. Mustafa A., Charrona J.-B.** Seed composition of ten industrial hemp cultivars approved for production in Canada. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2015. № 39. P. 8–12.

**Xiaolei Qu, Pedro J.J. Alvarez, Qilin Li** (2013). Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. *Water research*. № 47. P. 3931–3946.

**Y.B. Xie, C.-J. Liu** (2008). Stability of ionic liquids under the influence of glow discharge plasmas. *Plasma Processes and Polymers*. Vol. 5. № 3. P. 239–245.

**Yufriakova K. M., Bessarab T. V., Melnyk O. Yu.** Vykorystannia produktiv pererobky konopli u vyrobnytstvi khlibobulochnykh vyrobiv. *Aktualnye nauchnye issledovaniia v sovremennom mire*. 2020. Vol. 10 (66). P. 135–140.

**Yurchak, V., Karpyk, H.** (2013). Effect of dough making parameters on the quality of pasta enriched with bran dietary fibers. *Food chemistry and technology*. Kaunas: FIRUT. V. 47. № 2. pp. 41–47. URI: <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/15201>

**Yu-Ru Huang, Yen-Con Hung, Shun-Yao Hsu, Yao-Wen Huang, Deng-Fwu Hwang** (2008). Application of electrolyzed water in the food industry. *Food Control*. № 19. P. 329–345.

**Zhang Qian, Liang Yongdong , Feng Hongqing , Ma Ruonan , Tian Ying , Zhang Jue , and Fang Jing** (2013). A Study of Oxidative Stress Induced By Non-Thermal Plasma-Activated Water for Bacterial Damage. *Appl. Phys. Lett.* 102. .203–701. [doi.org/10.1063/1.4807133](https://doi.org/10.1063/1.4807133)

**Авдеев А.В.** (2002) Современный технический уровень машин для послеуборочной обработки зерна. Механизация и электрификация сельского хозяйства. № 6. С. 20–22.

**Адлер Ю.П., Марков Е.В.** (1971) Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука. 273 с.

**Адлер Ю.П., Маркова В.В., Грановский Ю.В.** (1976). Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 280 с.

**Антипьева А. С., Киметова Е. В.** (2012). О роли питания в развитии сахарного диабета и его осложнений. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. № 1(1). С. 17–18.

**Анурьев В.И.** (1967) Справочник конструктора-машиностроителя. М.: Машиностроение. 693 с.

**Атаназевич, В.И.** (2000). Сушка пищевых продуктов. М.: ДеЛи. 295 с.

**Бажай С.А.** (2005). Розроблення технології оздоровчих продуктів з прощеного зерна : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.18.02 “Технологія зернових, бобових, круп’яних продуктів та комбікормів”. Київ. 21 с.

**Баковец В.В., Поляков О.В., Долговесова И.П.** (1991). Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение. 168 с.

**Балабанов А.Б., Животов В.К., Русанов В.Д., Фридман А.А.** (1992). Об определении удельного энергозатрата в пространственно неоднородных плазмохимических разрядах. *Химия высоких энергий*. Т. 26. № 4. С. 366–370.

**Беккер М.Е.** (1984) Трансформация продуктов фотосинтеза / М. Е. Беккер. Рига: Зинатне, 1984. 190 с.

Биотехнология кормов и кормовых добавок / **А. И. Петенко, А. Г. Кощачев, И. С. Жолобова, Н. В. Сазонова** (2011) Краснодар: ФГОУ ВПО «Кубанский ГАУ», 454 с.

**Білічук А. В.** (2008). Шляхи розширення асортименту макаронних виробів профілактичного призначення. Хлібопекарська і кондитерська промисловість України. № 2. С. 30–32.

**Блехман И.И., Джанелидзе Г.Е.** (1964). Вибрационное перемещение. М.: Наука. 410 с.

**Булгаков Н.И.** (1976). Биохимия солода и пива. М.: Пищевая промышленность. 360 с.

**Бурков А.И.** (2002) Техническое обеспечение очистки семян трав. Здоровье-питание – биол. ресурсы. Киров, Т. 2. С. 131–140.

**Бурков А.И., Андреев В.Л.** (2002) Технология очистки семян зерновых культур с фракционированием на решетках и отдельной обработкой воздушным потоком. Научные труды. ВИМ. Т. 141, ч. 2. С. 103–111.

**Бурков А.И., Ефремов Д.Ф., Кутюков А.М.** (2003) Семейство унифицированных воздушно-решетных зерно- и семяочистительных машин. Тракторы и сельскохозяйственные машины. № 1. С. 5–7.

**Бутрова С. А.** (2013). От эпидемии ожирения к эпидемии сахарного диабета. Международный эндокринологический журнал. № 2(50).

**Бутырина, Т. Е., Тищенко А. П., Трещук С. В.** (2013). Особенности электролиза воды в условиях неравновесной низкотемпературной плазмы. *Праці Одеського політехнічного університету*. 3(42). С. 209–212.

**Василенко П.М.** (1960) Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. Киев: УАСХН, 1960. 284 с.

**Василенко П.М.** Основи аналітичних методів землеробської механіки. К.: Вид-во НАУ. 29 с.

**Верголяс М. Р., Гончарук В. В.** (2016). Токсическое влияние тяжелых металлов на организм гидробионтов. *Journal of Education, Health and Sport*. Vol. 6, № 6. P. 436–444.

**Гаппаров, М. Г., Кочетова А. А., Шубина О. Г.** (2006). Пищевые волокна – необходимый “балласт” в рационе питания. *Пищевая промышленность*. № 6. С. 56–58.

**Гармаш Н.Т.** (1955) Безрешетная сепарация мелкого зернового вороха. Киев: С. 96–104.

**Гинзбург А.С, Рысин А.П.** Современные проблемы теории и техники сушки пищевых продуктов. Исследование и разработка оборудования для сушки пищевых продуктов. Труды ВНИЭКИПродмаш., Вып. 56. М, 1981, с. 3-14 .

**Гинзбург А.С.** Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. - М.: Агропромиздат, 1985, с. 26 -31.

**Гладков Н. Г.** (1961). Зерноочистительные машины. Конструкция, расчет, проектирование и эксплуатация. М: Машгиз, 368 с.

**Глонь О. В.** (2004). Моделювання та оптимізація систем керування в умовах невизначеності: автореф. дис. канд. техн. наук: 01.05.02. Вінницький нац. техн. університет. Вінниця. 20 с.

**Гольяпин В.Я.** (2000) Машины и оборудование для послеуборочной обработки зерна. М.: Рос.НИИинформ. и техн.-экон. исслед. по инж.-техн. обеспечению агропром. комплекса (ФГНУ «Информагротех»). 80 с.

**Гольяпин В.Я., Стружкин Н.И.** (2002) Механизация послеуборочной обработки зерна. М.: Рос.НИИинформ. и техн.-экон. исслед. по инж.-техн. обеспечению агропром. комплекса. 75 с.

**Гончарова, О.В., Пугач А.М.** (2016). Гармонізація та біотехнологічне оновлення методів детермінації якості біологічної продукції. *Молодий вчений*. № 9(36). С. 111–114.

**Гордієнко Г. С.** (2012). Макаронні вироби з функціональними властивостями. *Хлібний бізнес*. № 2. С. 62–64.



**Горгинский В.В., Абрамов А.В.** (1972) К теории процесса сепарирования на отражательных столах. Труды ВНИИ зерна и продуктов его переработки (ВНИИЗ), М. Вып.73. С. 57–64.

**Горгинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А.** (1980) Процессы сепарации на зернообрабатывающих предприятиях. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Колос. 304 с.

**ГОСТ 10968-88** Зерно. Методы определения энергии прорастания и способности прорастания.

**Гринченко Н. Г.** (2007). Технологія реструктурованих напівфабрикатів на основі рибної сировини: дис. ... кандидата техн. наук: 05.18.16. Харків. 171 с.

**Державний реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні на 2018 рік:** станом на 16.07.2021 р. / Міністерство аграрної політики та продовольства України. URL: <https://sops.gov.ua/reestr-sortiv-roslin> (дата звернення 16.08.2021).

**Джигирей В.С.** (2007). Екологія та охорона навколишнього середовища: К.: Знання. 422 с.

**Дзюндзя, О. В.** (2016). “Технологія кексів функціонального призначення”. С. 15–22.

**Добош Д.** (1980). Электрохимические константы. Справочник для электрохимиков. М.: Мир. 368 с.

**Долинский А.А., Малецкая К.Д.** Методика определения кривых испарения и сушки единичных капель в высокотемпературной среде. В кн.: Тепло-массообмен. Киев: Наукова думка, 1968, с. 51–56.

**Домарецький В.А., Златєв Т.П.** (1993). Екологія харчових продуктів. К.: Урожай. 192 с.

**Дорохович В. В.** (2000). Розробка раціональних технологій діабетичних борошняних кондитерських виробів на основі фруктози: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.18.16. “Технологія продуктів харчування”. Київ. 21 с.

**Дорохович В. В.** (2010). Наукове обґрунтування і розроблення технологій борошняних кондитерських виробів спеціального дієтичного споживання: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.18.16. "Технологія продуктів харчування". Київ. 39 с.

**Драйвер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ (пер. с англ.) М.: Статистика, 1973, с. 392.

**Дрынча В.М., Ямпілов С.С.** (2000) О роли послеуборочной обработки зерна и подготовки семян для зернопроизводства России. Науч. труды ВИМ. Т. 134. С. 169–184.

**ДСТУ 7698:2015.** Крупи вівсяні. Технічні умови. Київ: Київський інститут хлібопродуктів. 15 с.

**Ермолаева Г.А., Колчева Р.А.** (2000). Технология и оборудование производства пива и безалкогольных напитков. Академия. 315 с.

**Ермольев Ю. И.** (2002) Перспективные технологии и технические средства для очистки зерна. Механизация и электрификация сельского хозяйства. № 6. С. 28–29.

**Єфімов В. Г., Ткачова А. А., Завріна С. В.** Мінеральний склад крупи гречаної, що реалізується в роздрібній торгівлі. *Науково-технічний бюлетень НДЦ біобезпеки та екологічного контролю ресурсів АПК.* 2017. № 2 (5). С. 69–72.

**Заика П.М.** (1998). Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах. Киев: Вид. УСХА, 1998. 625 с.

**Заика П.М., Слоновский Н.В.** (1997). Исследование траектории движения семян при пневмосепарировании семенных материалов. Технология производства и конструирования сельскохозяйственных машин: сб. научн. тр. Вид. ХГАУ. Харьков: С. 142–147.

**Заїка П.М.** (2004). Теорія сільськогосподарських машин. 2, ч. 2, кн. 2) "Зернозбиральні машини" Харків: Око. 404 с.

**Запольський А.К., Салюк А.І.** (2004). Основи екології. К.: Вища школа. 382 с.

**Запольський А.К., Українець А.І.** (2005). Екологізація харчових виробництв. К.: Вища школа. 423 с.

**Иванов Ю.А., Рытова Н.М., Тимакин В.Н., Эпштейн И.Л.** (1990). Диссоциация углеводов в неравновесной плазме тлеющего разряда пониженного давления. *Химия высоких энергий*. Т. 24. № 5. С. 460–465.

**Иодо И.И.** Механическое обезвоживание измельченного картофеля в технологии получения из него концентрированных кормов: Автореф. дис...канд. техн. наук. Минск, 1984, 17с.

Использование в птицеводстве функциональных кормовых добавок из растительного сырья / **А. Г. Кощяев, И. А. Петенко, И. В. Хмара, С. А. Калюжный, Е. В. Якубенко** // Ветеринария Кубани. 2013. № 5. С. 20-23.

**Іншакова І. О., Стахова К. Ю.** (2018). Структурно-семантичні особливості лексики на позначення страв українського народу в кулінарних книгах. Філологічні студії: науковий вісник Криворізького державного педагогічного університету. Т. 17. С. 33–44.

**Історія української коноплі.** *Народний оглядач*. URL: <https://www.ar25.org/article/istoriya-ukrayinskoyi-konopli.html> (дата звернення: 21.06.2021).

**Кадзюскене К. В., Чанкявичене Э. С., Кранаускас А. Э. и др.** (1990). Цветочная пыльца – натуральный адаптоген. Биологически активные продукты пчеловодства и их использование. Горький. С. 159–167.

**Казаков Е.Д., Карпиленко Г.П.** (2005). Биохимия зерна и хлебопродуктов. СПб.: ГИОРД. 512 с.

**Калина В. С., Гола А. В.** (2018). Макаронні вироби на основі клітковини гречаної. Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія: нові рішення у сучасних технологіях. № 45(1321). С. 160–165. [doi: 10.20998/2413-4295.2018.45.22](https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.45.22)

**Калина В. С., Гезь Я. В.** (2021). Удосконалення рецептури пастильних кондитерських виробів із використанням цикорію і топінамбуру. Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія: Нові рішення в сучасних тех-

нологіях. Харків: НТУ “ХПІ”. № 3 (9). С. 26–32. doi:10.20998/2413-4295.2021.03.04.

**Калина В. С., Гезь Я. В., Кузьо О. С.** (2021). Удосконалення рецептури кондитерського виробу на основі борошна з бобів нуту та ягід журавлини. Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ “ХПІ”. № 3 (9). С. 33–39. doi:10.20998/2413-4295.2021.03.05.

**Калина В. С., Гола А. В.** (2018). Перспектива гречаної клітковини у виробництві макаронних виробів. Збірник матеріалів XI Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів з міжнародною участю “Проблеми формування здорового способу життя у молоді”. Міністерство освіти і науки України. С. 60–61.

**Калина В. С., Дмитрієва Н. Ю.** (2018). Шоколадний десерт «брауні без глютенів» з вмістом функціонального інгредієнту нуту. Збірник матеріалів XI Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів з міжнародною участю “Проблеми формування здорового способу життя у молоді”. Міністерство освіти і науки України. С. 180–181.

**Калина В. С., Дмитрієва Н. Ю.** (2019). Удосконалення рецептури шоколадних тістечок “брауні” на основі бобової культури – нут. Вісник ХНТУ. С. 87–92.

**Калина В. С., Єфимов О. О.** (2019). Застосування стевії, цикорію та топінамбуру у дієтичному харчуванні хворих на діабет. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції “Органічне виробництво і продовольча безпека”. Житомир: Вид-во ЖНАЕУ. С. 170–173.

**Калина В. С., Миколенко С. Ю., Кузьо О. С.** (2019). Розробка та розширення асортименту кондитерських виробів з нутового борошна. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції “Органічне виробництво і продовольча безпека”. Житомир: Вид.-во ЖНАЕУ. С. 190–195.

**Калина В. С., Олійник О. В.** (2018). Підвищення біологічної цінності кондитерських виробів із вмістом бджолиного обніжжя. Збірник матеріалів XI

Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів з міжнародною участю “Проблеми формування здорового способу життя у молоді”. Міністерство освіти і науки України. С. 62–63.

**Калина В. С., Олійник О. В.** (2019). Удосконалення рецептури кремово-збивних цукерок “чарівне молоко”, збагачених бджолиним обніжжям. *Вісник ХНТУ*. С. 93–98.

**Калина В. С., Тарабара М. В.** (2018) Альгінат натрію у продуктах харчування. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я: тези доповідей XXVI Міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2018. Харків: НТУ “ХП”. С. 236.

**Калина В. С., Тарабара М. В.** (2019). Обґрунтування технології виробництва фруктово-овочевих гранул в системі натрію альгінат-кальцію фосфат. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Т. 19. № 1. С. 226–231. doi: [10.31388/2078-0877-19-1-226-231](https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-1-226-231)

**Калуныц К.А.** (1992). *Технология солода, пива и безалкогольных напитков*. М.: Колос. 446 с.

**Канабець В., Вировець В., Лайко І.** Ненаркотичні посівні коноплі – культура невичерпних можливостей. *Агробізнес сьогодні*. 2012. № 11 (234). 17–19 с.

**Касперович В.Л., Романюк Г.Г., Вавилов С.Ю.** (1999). Интенсификация процесса солодоращения. *Пиво и напитки*. № 1. С. 28.

**Киреева В. В.** Результаты комплексных исследований хлоропластных и цитоплазматических фракций растительных белков // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*. 2004. №S5.

**Кихтяк О. П.** (2006). Патогенетическое лечение сахарного диабета типа 2. Киев: София. 161 с.

**Клевцов К. М.** Фізико-технологічні властивості і хімічний склад насіння льону та конопель. *Вісник Харківського національного технічного університету*. 2015. № 4. С. 104–110.

**Князев Б.А.** (2003). Низкотемпературная плазма и газовый разряд. Новосибирск. 290 с.

**Кобозев И.В.** Пути снижения потерь каротина, сырого протеина и незаменимых аминокислот при заготовке разных видов кормов из многолетних трав. Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии, 1984, № 3, с. 34-43.

**Ковальова О.С., Семенжа І.С., Маляр К.В., Півоваров О.А.** (2011). Адсорбційні властивості солодового зерна при використанні активованих водних розчинів. V Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених. Тези доповідей. Т. 1. Дніпропетровськ. С. 480.

**Конопля – пища или наркотик? Незаслуженно забытый продукт.** *Нектар*: веб-сайт. URL:: <http://nectar.com.ua/konoplja-pischa-ili-narkotik-nezasluzhenno-zabytyj-produkt-a-75.htm> (дата звернення 1.06.2021).

**Коноплярство.** *Енциклопедія сучасної України*: веб-сайт. URL: [http://esu.com.ua/search\\_articles.php?id=4525](http://esu.com.ua/search_articles.php?id=4525) (дата звернення: 15.06.2021).

**Коробейников, С. М., Мелехов А. В., Бесов А. С.** (2002). Зажигание разряда в воде с помощью пузырьков. *Теплофизика высоких температур*. № 5. С. 706–713.

**Коробейников, С. М., Мелехов А. В., Синих Ю. Н., Соловейчик Ю. Г.** (2001). Влияние сильных электрических полей на поведение пузырьков в воде. *Тепл. Выс. Темп.* Т. 39. № 3. С. 1–5.

**Коробов В.И.** (2004). Математические пакеты в химических расчетах: прямая задача химической кинетики. *Exponenta Pro. Математика в приложениях*. № 3–4.

**Королев, Ю. Д. Месяц, Г.А.** (1991). Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука. 224 с.

**Коротков, К. Г.** (2007). Принципы анализа в ГРВ биоэлектрографии. СПб.: Реноме. 286 с.

**Коротков К.Г., Яковлева К.Г.** (2014). Применение метода ГРВ-биоэлектрографии в медицине (обзор литературы). *Вестник Санкт-Петербургского университета “Медицина”*. №11(2). С. 175–178.

**Коршунова Г. Ф., Саєнко Р. І.** (2014). “Доцільність використання борошна з біоактивованих бобів нуту в технології виготовлення борошняних виробів”. *Вісник Донецького національного університету економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського*. Сер.: Технічні науки 1. С. 72–78.

**Корыта И., Дворжак И., Богачкова П.** (1997). *Электрохимия*. М.: Мир. 472 с.

**Кочетов А.А., Максимов А.И.** (1991). Влияние ступенчатой ионизации на свойства неравновесной газоразрядной плазмы в гетерогенных плазмохимических процессах. Иваново: Ин-т хим. неводн. растворов АН СССР. 8 с.

**Кошовий М. Д., Костенко О. М., Заболотний О. В.** Оптимальне планування експерименту при дослідженні технологічних процесів, приладів і систем: навч. посіб. Харків: Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», 2010. 161 с.

**Кощаев А. Г.** Биотехнологические и физиолого-биохимические аспекты получения, консервирования и использования коагулята из сока люцерны при выращивании цыплят-бройлеров: дис. ... канд. биол. наук / А. Г. Кощаев. Краснодар, 2000.

**Кричковська Л., Белінська А., Жулінська О.** Функціональні компоненти в купажованих рослинних оліях із каротином. *Товари і ринки*. №2. 2010. С. 97–103.

**Кудряшов В.Л.** Производство белково-витаминных добавок из листостебельной биомассы // *Пищевая промышленность*. 2010. №12.

**Кулагин М.С. и др.** (1979) Механизация послеуборочной обработки и хранения зерна и семян.. М.: Колос. 256 с.

**Кулаков А.А., Гасимова Г.А., Чернов И.А.** Экологически чистая безотходная переработка фитомассы амаранта в белковые концентраты и сопутству-

ющие продукты //Экологические проблемы и пути их решения в зоне Среднего Поволжья: Материалы Всерос. науч. конф. Саранск, 1999. С. 109-111.

**Кутепов А.М., Захаров А.Г., Максимов А.И.** (1997). Проблемы и перспективы исследований активируемых плазмой технологических процессов в растворах. Доклад АН. Т. 357. № 6. С.782–786.

**Липкович Э.И.** Математическое моделирование системы машин для комплексной механизации сельскохозяйственного производства. В сб.: Системный анализ в разработке механизированных сельскохозяйственных технологий. Зерноград: ВНИПТИМЭСХ, 1984, с. 64-87.

**Листопад Г. Е.** (1963) Вибросепарация зерновых смесей. Волгоград: Книжное изд-во. 118 с.

**Литтл Т., Хиллз Ф.** Сельскохозяйственное опытное дело. Планирование и анализ. М.: Колос, 1981, с. 3 63,154-241.

**Луб'яні культури.** *Вікіпедія*. веб-сайт. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Луб'яні\\_культури](https://uk.wikipedia.org/wiki/Луб'яні_культури) (дата звернення: 7.12.2020).

**Лубников С.И., Тарушкин В.И., Ткачев Р.В.** (2002). Новая методика оценки качества семян и зерна. Зерновое хозяйство. № 6. С. 27–28 с.

**Мак-Ивен М., Филлипс Л.** (1978). Химия атмосферы. М.: Мир. 412 с.

**Мальцев, П.М.** (1964). Технология солода и пива. М.: Пищевая промышленность. 860 с.

**Манукян А.С., Рыбкин В.В.** (2019). Плазмохимия. Основы и применение. *НефтеГазоХимия*. № 3–4. С. 64–67. DOI:10.24411/2310-8266-2019-10411

**Маринченко І.О., Мохер Ю.В., Лайко І.М.** Довідник конопляра: довідник. Глухів, 2018. 32 с.

**Марчевский В.Н.** Технология и оборудование для сушки продуктов агропромышленного комплекса. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции: «Совершенствование техники, технологии сушки сельскохозяйственных и пищевых продуктов в соответствии с Продовольственной программой». М.,1984, с. 5-7.



**Марченко Л.В., Тищенко А.П., Ковалева Е.С., Пивоваров А.А.** (2009).

Стимуляторы солодоращения на основе плазмохимически активированной воды. IV Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених “Хімія і сучасні технології”. Тези доповідей. Дніпропетровськ. С.34.

**Масленников, П.В., Чупахина Г.Н., Краснопёров А.Г** (2013). Использование метода газоразрядной визуализации при оценке антиоксидантного статуса растений в условиях токсического действия кадмия. *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта*. Вып. 7. С. 14–21.

Математична модель руху компонентів насінневих сумішей по робочій площині / **Ю. О. Манчинський, М. В. Бакум, О. М. Горбатовський, М. М. Кравцов** (2008) // Механізація та електрифікація сільського господарства. Глеваха, Вип. 92. С. 156–162.

**Мачекас А. Ю., Астраускене А. Э.** (1988). Исследование динамики изменения витаминов в законсервированной обножке. Апитерапия. Биология и технология продуктов пчеловодство. Днепропетровск. Том. 2. С. 30 – 36.

**Мельников С.В., Алешкин В.Р., Рошин П.М.** Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос, 1980, 165 с.

**Методика визначення** гострої летальної (КНД 211.1.4.055-97) і хронічної (КНД 311.1.4.056-97) токсичної води на ракоподібних *Ceriodaphnia affinis* *Lilljebord*. Київ. 1997. 17 с.

Механізація сільськогосподарського виробництва: Исследование послыоного движения зерновой смечи на плоских вибрационных решетках **Л.Н. Тищенко, А.В. Миняйло, М.В. Пивень, С.А. Харченко**. Харків: вид. ХНТУСГ, Вип. 59. Т.1. С. 69–76.

**Мигаль М. Д., Шульга І. Л.** Динаміка зміни вмісту канабіноїдів у вегетативних і генеративних органах конопель. Луб'яні та технічні культури, збірник наукових праць. 2014. №3 (8). С. 71–80.

**Миколенко, С.Ю., Соколов В.Ю., Пенькова В.В.** (2016). Дослідження технологічних аспектів виробництва хліба із диспергованої зернової маси з ви-

користанням додаткової підготовки сировини. *Зернові продукти і комбікорми*. № 4(64). С. 10–15.

Моделирование процессов зерновых сепараторов (2010) **Л.Н. Тищенко, Д.И. Мазоренко, М.В. Пивень и др.** Харьков: Міськдрук, 2010. 360 с.

**Мыколенко, С.Ю., Пивоваров А.А., Тищенко А.П.** (2014). Повышение микробиологической устойчивости хлебопекарной продукции с применением плазмохимических технологий. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. № 2(12). С. 68-73.

**Нарцисс Л.** (1980). Технология солода. М.: Пищевая промышленность. 523 с.

**Нарцисс Л.** (2007). Пивоварение. Технология солодоращения. Т. 1. СПб.: Профессия. 584 с.

**Нєміріч О. В., Михайленко В. М., Браташ М. Й.** (2018). Перспективні напрямки підвищення біологічної цінності борошняного кондитерського виробу “брауні” спеціального призначення. *Актуальные проблемы современной науки*. С. 61–65.

**Новиков Ю.Ф.** Промышленное производство протеиновых концентратов из сока зелёных растений во Франции. *Сельское хозяйство за рубежом*, №10, 1979, с. 54-58.

**Новиков Ю.Ф., Касьян С.С., Чурсинов Ю.А., Шапаренко Л.Г. и др.** Рекомендации по использованию клеточного сока, протеиновой пасты и сухого протеинового концентрата из зеленых растений в кормлении сельскохозяйственных животных. Изд-во «Коммунар», Запорожье, 1985, 27 с.

**Новиков Ю.Ф., Коганов М.М., Лобач Г.А., Шая Ф.И.** Обобщенный показатель качества белков из нетрадиционных источников сырья. *Доклады ВАСХНИЛ*, № 1, 1988, с. 19-22.

**Новиков Ю.Ф., Скоробогатых Н.Н., Чурсинов Ю.А. и др.** Рекомендации по заготовке, хранению и использованию жома люцерны в рационах КРС. Запорожье: 1986, 22 с.

**Новиков Ю.Ф., Чурсинов Ю.А.** Производство белковых концентратов из зелёных растений. Днепропетровск: - Проминь, 1980, 75 с.

**Новиков Ю.Ф., Чурсинов Ю.А., Касьян С.С. и др.** Промышленный технологический регламент производства протеиновых концентратов из зеленых растений. Изд-во «Коммунар», Запорожье, 1987, 79 с.

**Нормативно-техническая документация для организации производства кормового белка по новой технологии.** Отчет ВНИТИцентр. Номер Госрегистрации 01.84.0055354. Инв. 02.86.0036659, 1986.

**Олексієнко Н., Оболкіна В., Сивній І.** Мікробіологічна безпека харчових продуктів. *Продовольча індустрія АПК.* №6 (14). С. 38–41.

**Ольшанський В. П., Кучеренок С.И., Бурлака В.В.** (2009). К расчету движения зерновой смеси по плоскому вибрирующему решету. Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні: Харків: вид. ХНТУСГ, Вип. 77. С. 238–244.

**Осейко М. І.** Технологія рослинних олій: підручник. Київ: Варта, 2006. 280 с.

**Осипова Г. А., Корячкина С. Я., Волчков А. Н.** (2010). Способы повышения биологической ценности макаронных изделий: монография. Орёл: ОрёлГТУ. 159 с.

**Панфилов В.А.** Научные основы развития технологических линий пищевых производств. М.: Агропромиздат, 1986, 240 с.

**Пархоменко В.Д., Краснокутский Ю.И., Сорока П.И. и др.** (1991). Плазмохимическая технология. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение. 392 с.

Пат. UA Україна 111577 A01K 43/00, G01N 33/08 Спосіб визначення живих зародків в період інкубації яєць. **Кобець А.С., Гончарова О.В., Пугач А.М.**; власники патенту Кобець А.С., Гончарова О.В., Пугач А.М. № u201606065. заяв. 03.06.2016. опубл. 10.11.2016. Бюл № 21.

Пат. на корисну модель № 133542, Україна, A23L 7/109. Макаронні виробы з гречаною клітковиною. **Калина В. С., Гола А. В.** № u201811345; заявл. 19.11.2018. опубл. 10.04.2019. Бюл. № 7.

Пат. на корисну модель № 134510, Україна, А23L 21/10. Склад десерту з функціональним інгредієнтом – нут. **Калина В. С., Дмитрієва Н. Ю.** № u201811352. заявл. 19.11.2018. опубл. 27.05.2019. Бюл. № 10.

Пат. на корисну модель № 135162, Україна, А23G 3/00. Кремово-збивні цукерки. **Калина В. С., Олійник О. В.** № u201811350; заявл. 19.11.2018. опубл. 25.06.2019. Бюл. № 12.

Пат. на корисну модель № 143450, Україна, А21D 13/045, А23G 3/48. Склад кексу з біологічно-активними речовинами з нуту та журавлини. **Калина В. С., Чурсінов Ю. О., Ковальова О. С.** № u202001692. заявл. 11.03.2020, опубл. 27.07.2020. Бюл. № 14.

Пат.64761 Україна, МПК С12С 1/00. Спосіб виробництва солоду з використанням активованих плазмохімічним методом водних розчинів. **Півоваров О.А., Ковальова О.С., Тищенко Г.П.** № a200905182. заявл. 25.05.2009. опубл. 25.11.2011. Бюл. 22.

Пат.77182 Україна, МПК С 12 С 1/00, 1/02. Спосіб пророщування зернового матеріалу з використанням водних розчинів оброблених холодною плазмою.

**Півоваров О.А., Ковальова О.С.** № u201005447. заявл.05.05.2010. опубл. 11.02.2013. Бюл. 3.

Патент 83998 UA. МПК А23L 1/16 (2006.01). Спосіб виготовлення макаронних виробів. **Юрчак В. Г., Карпик Г. В.;** заявник Національний університет харчових технологій. Київ. заявл. 22.03.2013. опубл. 10.10.2013.

Патент 85869 UA. МПК А 23 L 1/16. Макаронні вироби. **Юрчак В. Г., Карпик Г. В.;** заявник та патентовласник Національний університет харчових технологій. № u201303599. заявл. 22.03.2013. опубл. 10.12.2013. Бюл. № 23.

Патент на корисну модель UA 118883 U, Україна, МПК А23L 21/10. Склад шоколадного брауні «Безглютеновий». **Гвізда Н. В., Люлька О. М.** Заявник і патентовласник Національний університет харчових технологій. № u201703292. заявл. 06.04.17. опубл. 28.08.17. Бюл. № 16.

**Первичная и вторичная очистка зерна и семян.** Техника и оборудование для села. 2002. № 7. С. 14.

**Пестина А. А.** (2009). Технология реструктурированного полуфабриката из дыни: дис. ... канд. техн. наук : 05.18.16. Харьков. 177 с.

**Пивень В.В., Уманская О.Л.** (2003) Основные направления совершенствования технологии и техники для послеуборочной обработки зерна. Хранение и переработка сельхозсырья. № 8. С. 205–208.

**Пивоваров А. А., Тищенко А. П.** (2006). Неравновесная плазма: процессы активации воды и водных растворов. Днепропетровск: Акцент ПП. 225 с.

**Пивоваров А.А., Сергеева О.В.** (1999). Физико-химические превращения воды, обработанной плазмой тлеющего разряда. *Вопросы химии и химической технологии.* № 3. С.61–64.

**Пивоваров А.А., Сергеева О.В., Дубовик Т.Н.** (2009). Пример решения прямой кинетической задачи моделирования процесса превращений в дистиллированной воде под действием контактной неравновесной плазмы с использованием Mathcad Professional. *Вопросы химии и химической технологии.* № 5. С. 65–70.

**Пивоваров А.А., Сергеева О.В., Овчаренко О.В.** (2009). Пример решения прямой задачи химической кинетики с использованием средств Mathcad Professional. *Вопросы химии и химической технологии.* № 5. С. 82–87.

**Пивоваров А.А., Тищенко А.П., Томашева Е.В.** (2006). Применение плазмохимически активированных водных растворов в технологии пищевых производств. *Вопросы химии и химической технологии.* №5. С. 105–109.

**Пивоваров Є. П., Гудковська А. А., Калина В. С.** (2010). Вивчення властивостей системи натрію альгінат-кальцію цитрат в умовах створення гранульованих продуктів на основі плодово-ягідної сировини. Харчова наука і технологія. Одеса: ОНАХТ. Вип. 1. С. 62–63.

**Пивоваров, П. П., Пивоваров Є. П., Ключко В. О.** (2010). Вивчення механізму внутрішнього структурування для створення нових гранульованих про-

дуктів. Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. Вип. 2(12). С. 3–11.

**Пикаев А.К., Кабакчи С.А.** (1982). Реакционная способность первичных продуктов радиолиты воды: Справочник. М.: Энергоиздат. 200 с.

**Пилипченко А. В., Пісковий М. Б., Орлов М. М.** Рекомендації щодо технологічних особливостей вирощування конопель. Глобине: Лабораторія селекції та насінництва ТОВ «Науково-дослідний інститут сої». 2016. 28 с.

**Пири Н.У.** Белки из листьев зеленых растений. М.: Колос, 1980. С. 192.

**Піваров О.А., Ковальова О.С., Тищенко Г.П.** (2012). Математичне моделювання процесу водопоглинання в проростаючому зерні з використанням активованих водних розчинів. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. № 2. С. 91–95.

**Піваров О.А., Пономаренко Ю.В., Ковальова О.С.** (2011). Дослідження адсорбційних властивостей пророщеного зернового матеріалу при використанні активованих водних розчинів. Тези доповідей. 77 наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Ч. 1. К.: НУХТ. С. 96.

**Піваров О.А., Тищенко Г.П., Ковальова О.С.** (2010). Екологічні аспекти розвитку та удосконалення виробництв солодової галузі. Збірник статей VI Всеукраїнської науково-практичної конференції “Охорона навколишнього середовища промислових регіонів як умова сталого розвитку України”. Запорізька державна інженерна академія. С. 248–252.

**Піваров О.А., Тищенко Г.П., Ковальова О.С.** (2010). Екологічні аспекти розвитку та удосконалення виробництв солодової галузі. Збірник статей VI Всеукраїнської науково-практичної конференції “Охорона навколишнього середовища промислових регіонів як умова сталого розвитку України”. Запорізька державна інженерна академія. С. 248–252.

**Піваров О.А., Тищенко Г.П., Пономаренко Ю.В., Ковальова О.С.** (2012). Використання активованої води для підвищення якісних показників житнього солоду. Збірка матеріалів III Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні проблеми біології, екології та хімії”. Запоріжжя. С. 367–368.

**Півоваров О.А., Чурсінов Ю.А., Ковальова О.С., Пономаранко Ю.В.** (2013). Вплив плазмохімічно активованих розчинів на процес виробництва високоякісного житнього солоду. *Хранение и переработка зерна*. № 2(167). С. 45–48.

**Півоваров, О. А., Миколенко С. Ю., Тищенко Г. П.** (2012). Мікроструктурні особливості тіста на основі розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми. *Харчова наука і технологія*. № 1. С. 67–70.

**Покровский А.А., Ержанов И.Д.** Атакуемость белков пищевых продуктов протеолитическими ферментами. *Вопросы питания*. 1965, № 3. с. 38-44.

**Полак Л.С.** (1991). Низкотемпературная плазма. *Химия плазмы*. Новосибирск: Наука. 328 с.

**Полак Л.С., Гольденберг М.Я., Левицкий А.А.** (1984). Вычислительные методы в химической кинетике. М.: Наука. 280 с.

**Полак Л.С., Синяев Г.Б., Словецкий Д.И.** (1991). *Химия плазмы*. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение. Т.3. 328 с.

**Полумбрик М. О., Іщенко В. М., Сірик А. О., Костюк В. С., Полумбрик О. М.** (2014). Альгінати в харчових технологіях. Національний університет харчових технологій. С. 12–18.

**Потапенко С., Ємельянова Н., Українець А., Мукоїди Р., Чумакова О., Лапшин В., Мілютін А.** (2006). Пророщені зерна злакових культур. *Харчова та переробна промисловість*. №7. С. 19–21.

**Примаков О. А.** Ненаркотичні коноплі: перспектива використання. *Аграрний тиждень. Україна*. 2013. №35-36 (275). С. 14–15.

**Пристрій для обрушування насіння конопель:** пат. 122649 Україна: МПК В02В3/02, С11В1/04. № и 2017 05606; заявл. 06.06.2017; опубл. 25.01.2018, Бюл. №2.

**Про виробництво та обіг органічної сільськогосподарської продукції та сировини:** наказ М-ва освіти і науки України від 03.09.2013 р. № 9707. С. 1–19.

**Продукты переработки семян конопель.** *Hempflax*: веб-сайт. URL: <https://www.hempflax.com/toepassingen/nutraceuticals/> (дата звернення: 5.05.2021).

**Пути решения проблемы белка в животноводстве.** Под редакцией Мирочицкого Ф.В. Минск: Ураджай, 1981, с. 4, 110-113.

**Райцимринг А.М., Цветков Ю.Д.** (1980). Длина пробега медленных электронов и пространственное распределение ионов, электронов и радикалов в облучаемых полярных матрицах. *Химия высоких энергий*. Т. 14. № 3. С. 229–238.

**Рогова А. Л., Положишников Ю. О.** (2011). Підвищення біологічної цінності бісквітних виробів за рахунок використання борошна з нуту. Тези доп. “Харчові добавки. Харчування здорової та хворої людини”. С. 151–153.

**Рябець О. Ю.** (2008). Технологія аналогу ікри чорної з використанням альгінату натрію: дис. ... кандидата техн. наук : 05.18.16. Харків. 178 с.

**Севернев М.М., Терпиловский К.Ф., Майонов В.В.** Механическое обезвоживание и термическая сушка высоковлажных кормов. М.: Колос, 1980, с. 35-39.

**Сеник Я.С., Сулима Л.А., Хоменок В.А.** Теоретическое обоснование параметров процесса охлаждения кормовых брикетов. Способы и средства механизации работ в растениеводстве Нечерноземной зоны РСФСР. Сборник научных трудов, Л.: выпуск 42, 1984, с. 86-91.

**Сергеева О. В., Пивоваров А. А.** (2015). Факторы, влияющие на характер плазменного разряда с электролитным катодом при фиксированном давлении. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 75. С. 31–36. DOI:10.15587/1729-4061.2015.44243

**Скурихин И. М., Волгарев. М. Н.** (1987). Химический состав пищевых продуктов: справочник. М.: Агропромиздат. 360 с.

**Смоляр В. І.** (2013). Формула раціонального харчування. Проблеми харчування. № 1. С. 5–9.

Создание и исследование технологических схем машин и оборудования предприятий для производства обезвоженных кормов в хозяйствах. **Новиков**



**Ю.Ф., Чурсинов Ю.А., Ткаченко В.А. и др.:** Депонированный отчет, гр. № 75055298, Б998991, 1981, 61 с.

**Сокольский А.Г., Гордиец Б.Ф., Горбачев Ю.Е. и др. (2004).** Концептуальное и компьютерное моделирование в задачах изучения нестационарных процессов активации водных растворов низкотемпературной плазмой. Труды 6-ой Международной конференции “экология человека и природа”. М.: Изд-во Ив. ГХТУ. С. 85–87.

**Старкова Н. Т. (2002).** Клиническая эндокринология. Руководство. Санкт-Петербург: Питер. Изд. 3. 576 с.

**Сухарев С.М. Чудак С.Ю., Сухарева О.Ю. (2008).** Техноекологія та охорона навколишнього середовища. Львів: “Новий Світ-2000”.

Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв. (2008) Модель однослойного движения зерновой смеси по наклонному рифленому решету (**Л. Н. Тищенко, С. И. Кучеренко, В. П. Ольшанский, О. Б. Зайцев**): Харків: вид. Вип. 74. С. 28 – 39.

Технология получения сока и производство гранул из механически обезвоженных кормов. **Новиков Ю.Ф., Чурсинов Ю.А. и др.** Научно-технический бюллетень по механизации и электрификации животноводства. Вып. 4. Запорожье, 1975, с. 12-19.

Технология производства биологически-активных фитокормовых добавок из сока зеленых растений / **Чурсинов Ю.А., Ковалева Е.С., Калина В.С., Мыколенко С.Ю., Хомык Н.И.** // Птицеводство. 2019. № 09-10. С.51-57. DOI: <http://dx.doi.org/10.33845/0033-3239-2019-68-9-10-51-57> (Журнал входит в подборку ведущих российских научных журналов Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе, с 2018 г. индексируется базой CAB Abstracts (Великобритания))

**Технологія вирощування луб'яних культур. Напрями діяльності:** веб-сайт. URL: [http://ibc-uaas.at.ua/index/naprjami\\_dijalnosti/0-48](http://ibc-uaas.at.ua/index/naprjami_dijalnosti/0-48) (дата звернення: 12.07.2021).

**Тищенко Л.Н., Ольшанский В.П., Ольшанский С.В.** (2009) К расчету движения зерновой смеси на вибрирующем плоском наклонном решете. Вібрації в техніці і технологіях № 1. С. 109–113.

**Тищенко Л.Н., Ольшанский В.П., Ольшанский С.В.** (2010) Гидродинамика сепарирования зерна. Харьков: Міськдрук. 174 с.

**Томашевский В., Жданова Е.** Имитационные моделирование в среде ОР88. М.: Бестселлер, 2003 416 с.

**Фарбман Г.Я.** Особенности процессов брикетирования и гранулирования. Механизация производственных процессов в животноводстве. Сборник трудов ЛСХИ, том 362. Л. Пушкин, 1978, с. 74-76.

**Филоненко Г.К., Гришин М.А., Гольденбарг Я.М., Коссек В.К.** Сушка пищевых растительных материалов. М.: Пищевая промышленность, 1971, с.134-144.

**Фомин В.И.** Цех для приготовления протеиновых концентратов из люцерны. Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1982, № 9, с. 63-64.

**Холло Я., Гёрёг Е., Кох Л., Загваи И.** (ВНР). Способ получения свободного от волокон экстракта зелёной массы. Авторское свидетельство, № 332598, 1972.

**Хомич Г. П.** (2017). “Використання журавлини в технології борошняних кондитерських виробів”.

**Цыганова Т. Б.** (1997). Полифункциональные добавки и их роль в создании хлебобулочных изделий лечебно-профилактического назначения. Междунар. симп. “Экология человека: пищевые технологии и продукты XXI века”. Хранение и переработка сельхозсырья. № 12. С. 43–45.

**Черняева И.И., Разуваева Г.А., Вольнова И.И., Добрыниной Т.А.** (1963). Химия перекисных соединений. М.: Изд-во АН СССР. 125 с.

**Черняк В.П.** (2005). Фізичні механізми керування нерівноважністю плазми в стаціонарних динамічних газорозрядних системах: автореф. дис. ... докт. ф.-м. наук.01.04.08. Київський національний університет. Київ. 39 с.

**Чурсинов Ю.А., Шапошникова А.В., Воленко Н.П.** Сравнительная теплоэнергетическая оценка способов сушки протеиновой пасты и смесей из сока зелёных растений. Научно-технический бюллетень ЦНИПТИМЭЖ. Кормопроизводство и кормоприготовление. Вып.21 Запорожье, 1984, с.73-78.

**Юдина С. Б.** (2008). Технология продуктов функционального питания. М.: Дели принт. 280 с.

**Якубко Х. Д., Ешкайт Х.** (1985). Амінокислоти. Пептиди. Білки. М.: Світ. 456 с.

**Яценко А. А., Корниенко А. В., Жужжалова Т. П.** (2002). Цикорий корнеплодный. Воронеж: ВНИИСС. 135 с.



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Дніпровський державний  
аграрно-економічний університет

А.С. Кобець, С.П. Сокол, А.М. Пугач, Ю.О. Чурсінов,  
О.А. Півоваров, С.Ю. Миколенко, О.С. Ковальова,  
В.С. Калина, В.С. Кошулько, Д.О. Тимчак,  
Н.А. Сова, К.А. Худайбердієва

## **ЗЕМЛЕРОБСЬКА МЕХАНІКА**

Том 4

### **Інноваційні технології харчових виробництв**

Комп'ютерна верстка М.П. Гончаренко, А.А. Павленко

Редакційно-видавничий відділ  
Дніпровського державного аграрно - економічного університету  
49600, м. Дніпро, вул. С.Єфремова, 25

Підписано до друку 31.10.2022. Формат 70x108/16.  
Тираж 99 прим. Замов. № 1503/161.  
Обл.-вид. арк. 16,9. Ум. друк. арк. 23 .  
Наклад 99 прим. Друк офсетний. Зам. 5103/161.

Видавець «Свідлер А.Л.»  
49041, м. Дніпро, а/с 2493, тел./факс +38 (067) 635-78-83  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи:  
Серія ДК № 3876 від 10.09.2010 р.  
Надруковано в типографії видавця «Свідлер А.Л.»  
<http://garant-sv.com.ua>

**ISBN 978-617-627-174-1**