

Е. Б. Алієв · С. Ю. Миколенко · Н. А. Сова
О. Ю. Алієва · Р. Д. Малєгін · К. О. Лупко
М. О. Лінко · Я. В. Гезь · Л. С. Безугла

ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗВІДХОДНОЇ ПЕРЕРОБКИ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ У ХАРЧОВІ ПРОДУКТИ І КОРМИ

КОЛЕКТИВНА МОНОГРАФІЯ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпровський державний аграрно-економічний університет

**Е. Б. Алієв, С. Ю. Миколенко, Н. А. Сова, О. Ю. Алієва,
Р. Д. Малєгін, К. О. Лупко, М. О. Лінко, Я. В. Гезь, Л. С. Безугла**

ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗВІДХОДНОЇ ПЕРЕРОБКИ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ У ХАРЧОВІ ПРОДУКТИ І КОРМИ

КОЛЕКТИВНА МОНОГРАФІЯ

*За загальною редакцією
доктора технічних наук, старшого дослідника,
професора кафедри інжинірингу технічних систем
Е. Б. Алієва*

Дніпро | ЛІРА | 2022

Схвалено до друку вченою радою Дніпровського державного аграрно-економічного університету (протокол № 3 від 01.12.2022 р.)

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Піваров Александр Андрійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції Дніпровського державного аграрно-економічного університету

Козаченко Олексій Васильович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри сільськогосподарських машин Державного біотехнологічного університету

Рибчинський Родіон Станіславович, кандидат технічних наук, директор спілки «Борошноmeli України», голова правління галузевого об'єднання «Укрхарчопром».

Т 38 Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / за заг. ред. Е. Б. Алієва. Дніпро: ЛІРА, 2022. 192 с.

ISBN 978-966-981-687-0

У монографії висвітлено результати маркетингового аналізу регіонального і світового ринку виробництва біологічно цінних харчових продуктів і кормів із зернової сировини. Представлено загальноприйняті і нові технології переробки зернової сировини у харчові продукти та корми. Наведено технічне забезпечення переробки зернової сировини у харчові продукти і корми (чарунковий циліндричний трієр для підготовки зернових компонентів, установка для виготовлення кормових пелет, кавітаційний диспергатор-гомогенізатор для приготування рідких харчових продуктів і кормів, експандер для приготування харчових продуктів і кормів, шнековий диспергатор для подрібнення зернової сировини). Наведено розроблений спосіб і пристрій автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів. Монографія призначена для науковців, аспірантів, технологів, студентів, фахівців і конструкторів машин та обладнання сільськогосподарського і харчового виробництв.

УДК 664.7:339.138(02.064)

© Алієв Е. Б., Миколенко С. Ю., Сова Н. А.,
Алієва О. Ю., Малегін Р. Д., Лупко К. О.,
Лінко М. О., Гезь Я. В., Безугла Л. С., 2022

© ДДАЕУ, 2022

© ЛІРА, 2022

ISBN 978-966-981-687-0

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
------------	---

РОЗДІЛ 1.

МАРКЕТИНГОВИЙ АНАЛІЗ РЕГІОНАЛЬНОГО І СВІТОВОГО РИНКУ ВИРОБНИЦТВА БІОЛОГІЧНО ЦІННИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ І КОРМІВ ІЗ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ	8
--	----------

- 1.1. Стан ринку зернової сировини для біологічно цінних харчових продуктів 8
- 1.2. Економічний аспект територіального виробництва зернової сировини в Україні 13
- 1.3. Аналіз вітчизняного та закордонного асортименту конопляних харчових продуктів..... 19

РОЗДІЛ 2.

ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ В ХАРЧОВІ ПРОДУКТИ ТА КОРМИ	21
---	-----------

- 2.1. Асортимент традиційних продуктів переробки зерна.....21
- 2.2. Технологія виробництва борошна 23
- 2.3. Технологія виробництва круп 25
- 2.4. Технологія виробництва олії 26
- 2.5. Технологія виробництва комбікормів 35
- 2.6. Технологія безвідходної переробки зернової сировини в корми 39

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПЕРЕРОБКИ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ В ХАРЧОВІ ПРОДУКТИ Й КОРМИ	46
---	-----------

- 3.1. Чарунковий циліндричний трієр для підготовки зернових компонентів 46

3.1.1. Аналіз конструкцій трієрів для сепарації зернових компонентів.....	46
3.1.2. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів трієра для сепарації зернових компонентів.....	50
3.1.3. Методика чисельного моделювання трієра для сепарації зернових компонентів.....	54
3.1.4. Результати чисельного моделювання трієра для сепарації зернових компонентів.....	59
3.1.5. Лабораторний зразок удосконаленого трієра для сепарації зернових компонентів.....	72
3.2. Установка для виготовлення кормових пелет	74
3.2.1. Аналіз технічних засобів для отримання кормових пелет	74
3.2.2. Методика експериментальних досліджень технологічного процесу формування пелет з білкового порошку	84
3.2.3. Результати експериментальних досліджень технологічного процесу формування пелет з білкового порошку	91
3.3. Кавітаційний диспергатор-гомогенізатор для приготування рідких харчових продуктів і кормів	96
3.3.1. Аналіз сучасних технологій та устаткування для переробки кормів на принципі кавітації.....	96
3.3.2. Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми кавітаційного диспергатор-гомогенізатора .	102
3.3.3. Методика чисельного моделювання кавітаційного диспергатор-гомогенізатора	107
3.3.5. Методика розрахунку параметрів кавітаційного диспергатор-гомогенізатора	117
3.3.6. Експериментальний зразок кавітаційного диспергатор-гомогенізатора	122
3.4. Експандер для приготування харчових продуктів і кормів	125

3.4.1. Аналіз техніко-технологічного оснащення процесів екструзійного та експандованого приготування харчових продуктів і кормів	125
3.4.2. Фізико-математичний апарат чисельного моделювання експандера кормів.....	132
3.4.3. Результати чисельного моделювання експандера кормів.....	140
3.5. Шнековий диспергатор для подрібнення зернової сировини	148
3.5.1. Доцільність диспергування зерна для харчових продуктів.....	148
3.5.2. Аналіз обладнання для диспергування зернової сировини.....	149
3.5.3. Математична модель взаємодії зернової сировини зі шнековим живильником при диспергуванні	154
РОЗДІЛ 4.	
СПОСОБИ, МЕТОДИКИ І ПРИСТРОЇ АНАЛІЗУ ВЛАСТИВОСТЕЙ ХАРЧОВОЇ ПРОДУКЦІЇ І КОРМІВ	159
4.1. Спосіб автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів .	159
4.2. Пристрій для визначення структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів.....	163
4.3. Методика лабораторних досліджень з визначення фізико-механічних властивостей зернової сировини....	168
ВИСНОВКИ.....	174
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	178

ВСТУП

Продовольча проблема є однією з ключових у забезпеченні добробуту і здоров'я людей, а продовольча безпека є найважливішим чинником у національній безпеці будь-якої держави. Підвищення кількості продовольства є одним з основних елементів майбутнього, у якому населення планети, за прогнозами ООН, до 2050 року перевищить 9 млрд. При цьому, за даними FAO, втрати продовольчої сировини вздовж ланцюга постачання на сьогодні перевищують 30% для зерна. Наявність доступної харчової продукції в достатній кількості і високої якості є викликом для сучасності внаслідок обмеженості ресурсів. Тому необхідним є застосування системного підходу до виробництва сільськогосподарської продукції, комплексної безвідходної переробки сировини і створення високоякісних харчових продуктів і кормів, безпечних для кінцевого споживача.

Впровадження системи ефективного менеджменту продовольчої безпеки і якості є важливими не лише для захисту здоров'я і добробуту населення, але і для прискорення економічного розвитку, поліпшення засобів існування шляхом збільшення кількості української продукції на міжнародних ринках. Тому актуальною проблемою національної продовольчої безпеки є підвищення ефективності функціонування продовольчого ланцюга шляхом застосування інноваційних методів обробки і комплексної безвідходної переробки зернової сировини.

Мета роботи – наукове обґрунтування і розробка комплексу безвідходних технологій переробки зернової сировини на біологічно цінні харчові продукти і корма з використанням інноваційних методів обробки на конструктивно удосконаленому обладнанні.

Завдання, на вирішення яких спрямована науково-дослідна робота:

- провести маркетинговий аналіз регіонального і світового ринку виробництва біологічно цінних харчових продуктів і кормів із зернової сировини;
- розробити технології переробки зернової сировини та виробництва харчових продуктів і кормів підвищеної біологічної цінності за рахунок інноваційних методів обробки сировини;

- удосконалити існуючі та розробити нові методики аналізу якості харчової продукції і кормових добавок;
- обґрунтувати конструктивно-технологічні параметри технічних засобів для переробки зернової сировини та виробництва харчових продуктів і кормів.

У процесі проведення наукової роботи використано широкий спектр сучасних методів та методик. Маркетинговий аналіз українського і світового ринку виробництва біологічно цінних харчових продуктів із зернової сировини був проведений з використанням методів порівняння, систематизації, виявлення причинно-наслідкових зв'язків між маркетинговими показниками та їх комплексності. Аналіз хімічних, фізичних і структурно-механічних властивостей зернової сировини і продуктів її переробки був проведений на основі лабораторних досліджень із застосуванням як загальноприйнятих, так і нових методик та приладовимірювального обладнання. Розробка технічних засобів технологічних процесів переробки зернової сировини та виробництва харчових продуктів і кормів ґрунтувалася на сучасних автоматизованих комплексах Siemens і системах автоматизованого проєктування (CAD) і виготовлення (CAM) NX (виробництва Siemens PLM Software). Теоретичні дослідження процесів виробництва харчових продуктів і кормів проведені класичними аналітичними методами із застосуванням принципів класичної механіки і термодинаміки, а також методів чисельного моделювання на базі програмного пакета CAE-системи Simcenter STAR-CCM+ (ДДАЕУ на сьогодні є єдиним офіційним користувачем цієї системи в Україні). Експериментальні дослідження параметрів і режимів технологічних процесів виробництва харчових продуктів і кормів із зернової сировини проведені з використанням математичного методу планування експерименту, методів натурних спостережень та експертних оцінок, а обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень здійснюватимуться з використанням теорії ймовірності, кореляційно-регресійного аналізу.

Розділ 1. МАРКЕТИНГОВИЙ АНАЛІЗ РЕГІОНАЛЬНОГО І СВІТОВОГО РИНКУ ВИРОБНИЦТВА БІОЛОГІЧНО ЦІННИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ І КОРМІВ ІЗ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ

1.1. Стан ринку зернової сировини для біологічно цінних харчових продуктів

Автор: Безугла Л. С.

Маркетингова орієнтація сільськогосподарських підприємств надає можливість раціонального використання обмежених ресурсів. У ринкових умовах господарювання метою дієвої системи управління є достатній рівень прибутковості внаслідок отримання стійких позицій на ринку за допомогою досконалого аналізу платоспроможного попиту та його задоволення. У складних умовах погіршення екологічного стану у світі виникає питання стосовно задоволення біологічно цінними продуктами населення [1].

Ключовим аспектом підтримки продовольчої безпеки Україні є безперерйне забезпечення населення продуктами харчування, у тому числі й біологічно цінними, керуючись раціональним застосуванням сільськогосподарської сировини, зменшенням її втрат, підвищенням ефективності виробництва в масштабах усього агропромислового комплексу. За таких умов важливою є організація постачання якісних продуктів населенню не лише в сезон збору та перероблення плодоовочевої сировини і не лише в сировинних зонах, а протягом усього року, в усіх регіонах України.

Україна містить чверть чорноземів світу, і 56,6 % усіх земель країни використовується як рілля. Україна має 7,5 % сільськогосподарських земель країн СНД, 15,1 % ріллі, 6,2 % луків та 1,6 % пасовищ. Водночас Україна виробляє понад 20 % зерна, зібраного в країнах СНД, і близько 25 % м'яса і молока. Однак екологічні та економічні проблеми в Україні все більше впливають на сільське господарство.

Таблиця 1.1

Виробництво основних сільськогосподарських культур в країнах Європейського союзу, Китаї, Японії, США та Україні у 2020 році, тонн

Країна	Ячмінь	Зернова суміш	Кукурудза	Жито	Пшениця
Австрія	695 072	8 455	2 130 339	177 447	1 370 960
Бельгія	320 395	14 716	442 995	2 319	1 652 249
Китай	1 487 906	–	257 348 659	1 044 776	131 447 224
Хорватія	227 520	7 461	2 147 275	4 100	744 405
Чехія	1 606 034	4 845	489 154	120 160	4 417 841
Данія	3 485 656	19 228	35 923	482 166	2 654 819
Естонія	347 497	1 214	–	29 511	450 265
Фінляндія	1 336 100	38 800	–	42 300	494 700
Франція	11 193 034	361 351	12 667 393	110 092	35 798 234
Німеччина	9 583 600	50 200	3 344 000	2 201 400	20 263 500
Греція	344 610	4 909	1 205 980	18 960	1 072 940
Угорщина	1 141 007	–	7 963 217	84 116	5 245 890
Ірландія	1 224 900	–	–	635	506 800
Італія	1 010 328	–	6 179 035	10 639	6 932 943
Японія	174 700	–	165	–	764 900
Латвія	306 300	10 500	–	81 600	1 431 600
Литва	619 538	20 225	87 587	43 992	2 838 899
Люксембург	34 662	486	565	6 048	78 409
Мальта	2 186	–	–	–	12 208
Нідерланди	253 423	–	84 894	4 457	985 297
Норвегія	400 000	–	–	7 600	123 500
Польща	3 048 273	2 505 509	3 864 028	2 166 884	9 820 315
Португалія	49 584	–	713 860	16 706	67 749
Румунія	1 870 710	–	18 663 939	28 636	10 143 671
Словаччина	486 898	–	1 515 834	41 008	1 927 926
Словенія	88 057	4 283	350 489	4 542	121 901
Іспанія	9 129 535	25 841	3 842 519	388 467	7 989 906
Швеція	1 094 400	22 200	–	88 200	1 620 300
Україна	7 349 140	6 010	35 801 050	393 780	24 652 840
США	3 332 970	–	392 450 840	214 180	51 286 540

Таблиця 1.2

Виробництво основних сільськогосподарських культур у країнах Європейського союзу, Китаї, Японії, США та Україні у 2020 році, тон

Країна	Овес	Картопля	Цукрові буряки	Сорго	Соняшник
Австрія	74 716	697 931	2 150 192	27 586	–
Бельгія	18 202	3 045 443	5 192 049	–	–
Китай	1 004 592	90 321 442	12 077 618	2 194 361	32 950
Хорватія	44 827	182 261	3 724 309	152	–
Чехія	152 656	583 560	–	–	–
Данія	289 933	1 806 766	2 107 616	–	–
Естонія	78 381	88 434	–	–	–
Фінляндія	818 200	600 300	355 400	–	–
Франція	427 994	7 870 973	39 579 925	323 143	–
Німеччина	577 600	8 920 800	26 191 400	–	–
Греція	80 720	465 770	353 078	7	–
Угорщина	59 166	330 545	941 655	38 878	7
Ірландія	122 300	273 000	78 597	–	–
Італія	243 366	1 307 598	1 941 479	293 865	248 847
Японія	278	2 261 945	3 611 000	–	–
Латвія	188 200	426 900	–	–	–
Литва	182 442	296 229	888 616	–	–
Люксембург	6 977	16 211	–	–	–
Мальта	–	7 977	–	–	–
Нідерланди	7 011	6 029 734	6 508 142	–	–
Норвегія	146 500	326 400	–	–	–
Польща	1 166 051	7 478 184	14 302 911	–	9 663
Португалія	55 779	431 686	8 506	–	16 948
Румунія	383 722	3 022 758	978 266	76 309	3 062 690
Словаччина	29 874	169 953	1 311 972	1 726	201 614
Словенія	3 397	72 917	–	–	791
Іспанія	1 486 948	2 010 933	2 870 907	25 589	14 777
Швеція	363 500	720 200	1 698 400	–	–
Україна	418 460	22 503 970	13 967 700	193 980	109
США	814 720	20 607 342	30 068 647	9 271 070	107 220

На стратегічні рішення виробників рослинної сировини біологічно цінних харчових продуктів також впливають ринкові ризики, пов'язані з невизначеністю щодо майбутніх цін на вхідні ресурси та продукти виробництва, надійність джерел вхідних ресурсів. Тому, хоча ринкові ризики по суті є екзогенними, сільськогосподарські товаровиробники можуть впливати на мінливість врожайності та розподіл прибутку за вибором вхідних даних або комбінації вхідних ресурсів. Загалом виробничі ризики мають величезний вплив на сільське господарство, особливо структура виробництва та поведінка постачальників.

Міністерством охорони здоров'я України визначені раціональні норми харчування, згідно з якими населення країни повинно споживати 161 кг овочів за один рік (на одну особу). За даними Держкомстату в Україні збільшується кількість споживання овочів та картоплі [2]. У таблиці 1.3 показано обсяг споживання плодоовочевої продукції однією особою за рік у Дніпропетровській області та в Україні загалом. Попит на плодоовочеву продукцію доводить той факт, що овочі й фрукти є надзвичайно важливим елементом в раціоні українців.

Найбільший обсяг споживання на одну особу в рік у Дніпропетровській області та Україні загалом овочів і баштанних продовольчих культур. У 2020 році порівняно з 2010 роком споживання овочів і баштанних продовольчих культур в Україні збільшилось на 20,4 кг на одну особу, або на 14,2%. У Дніпропетровській області споживання зазначених культур у 2020 році порівняно з 2010 роком збільшилось на 25,5 кг, або на 16,6%. Споживання населенням картоплі, плодів, ягід та винограду також має динаміку до збільшення. Загалом по Україні споживання картоплі збільшилося 8,1%, а в Дніпропетровській області збільшення становило 32,6%. Споживання плодів, ягід та винограду в Дніпропетровській області протягом досліджуваного періоду збільшилось на 23,6%.

Аналіз динаміки виробництва плодоовочевої продукції в Україні протягом 2010–2020 років має позитивну динаміку. Це свідчить про те, що обсяги виробництва плодоовочевої продукції з кожним досліджуваним роком збільшуються. Виробництво картоплі у 2020 році порівняно з 2010 роком збільшилось на 20,31%, або 3 799 т, овочів і баштанних продовольчих продуктів – на 1067 т (12,03%). Аналізуючи обсяги виробництва плодів, ягід та винограду також спостерігається позитивна динаміка у 2020 році порівняно з 2010 роком збільшення становило 885 т (табл. 1.4). Усе це свідчить про збільшення попиту на ринку плодоовочевої продукції.

Таблиця 1.3

Обсяги споживання плодоовочевої продукції в Дніпропетровській області та в Україні загалом, кг на одну особу в рік [3]

Регіон	2010	2014	2017	2018	2019	2020	Відхилення	
							+,-	%
Картопля								
Україна	128,9	141,0	137,5	139,8	143,4	139,4	10,5	108,1
Дніпропетровська область	93,6	119,7	116,5	119,4	124,8	124,1	30,5	132,6
Овочі і баштанні продовольчі культури								
Україна	143,5	163,2	160,8	163,7	159,7	163,9	20,4	114,2
Дніпропетровська область	153,7	180,6	184,2	185,7	173,5	179,2	25,5	116,6
Плоди, ягоди та виноград								
Україна	48,0	52,3	50,9	49,7	52,8	57,8	9,8	120,4
Дніпропетровська область	57,1	59,1	57,1	59,1	61,1	70,6	13,5	123,6

Таблиця 1.4

Динаміка виробництва плодоовочевої продукції в Україні протягом 2010–2020 років, тис. тонн

Продукція	2010	2014	2017	2018	2019	2020	Відхилення 2020 до 2010	
							+,-	%
Картопля	18705	23693	20839	21751	22208	22504	3799	120,31
Овочі і баштанні продовольчі продукти	8873	10323	9792	9998	9721	9940	1067	112,03
Плоди, ягоди та виноград	2154	2435	2539	2385	2458	3039	885	141,09

За даними порталу Profihort [4] на плодоовочевому ринку України функціонують такі найвідоміші виробники й переробники плодоовочевої сировини, а саме: «Сади Дніпра», «Фрутлайф», «Дунайський аграрій», «Аврора», «Агрокомплекс Барський», «Агро-Патріот», «Таврія-Скіф», Fresh Family, «Владам», ТОВ «Плодоовочевий комбінат «Херсон»», «Євросервісгруп», «Родючість», «Любокут», «Агро-Поставка», Fresh Salat і Demetraleх.

У сучасних умовах важливим складником плодоовочевого ринку є виробники органічних овочів та ягід. І. Б. Чичкало-Кондрацька та І. В. Новицька звертають увагу на те, що в умовах сьогодення зростає зацікавленість споживачів до продуктів харчування, які є екологічно чистими і виробництво яких не має негативного впливу на навколишнє середовище. Такі продукти представлені на ринку як продукція органічного виробництва. Гарантією того, що продукт виготовлений відповідно до вимог органічного виробництва, є відповідне маркування, яке підтверджується сертифікатом [5].

Найбільша кількість виробників органічної плодоовочевої продукції в Україні зосереджена в Київській, Вінницькій, Харківській та Житомирській областях [6].

Пошук шляхів поліпшення харчування населення полягає у формуванні кон'юнктури продовольчого ринку біологічно цінних продуктів харчування та сировини для переробної та харчової промисловості [7]. Цього можна досягти лише об'єднавши сили виробників сільськогосподарської продукції, переробників і харчових виробників. Вирощування та постачання в промисловому масштабі рослинної сировини з високим вмістом біологічно активних речовин і споживання цих продуктів у достатній кількості у свіжому та переробленому вигляді сприятиме поліпшенню здоров'я населення та розвитку національного ринку сільськогосподарських продуктів, збільшенню експорту в ЄС, виходу на нові ринки.

1.2. Економічний аспект територіального виробництва зернової сировини в Україні

Автор: Безугла Л. С.

Сучасний стан розвитку аграрного бізнесу в Україні перебуває в процесі трансформації, що пояснюється спробами зменшити відставання у швидкості здійснення ринкових перетворень порівняно з іншими секторами економіки. Проведення маркетингових досліджень на ринку виробництва певних видів продукції дає змогу оцінити стан та перспективи їх подальшого розвитку. Виробництво органічної продукції з кожним роком стає все більш актуальним внаслідок значної кількості екологічних, економічних, а також соціальних переваг на протипагу традиційному сільськогосподарському виробництву. Варто зауважити, що інтенсивний метод ведення сіль-

ського господарства, який переважно застосовується в сучасному світі, деструктивно впливає на навколишнє середовище, а також виснажує природні ресурси, перетворює їх на непридатні для ведення сільськогосподарського виробництва.

Ключова особливість землеробства України на сучасному етапі ґрунтується на виробництві продукції рослинництва при обмежених витратах антропогенної енергії і убезпечення довкілля від процесів деградації та забруднення. Вирішення цієї проблеми можливе шляхом упровадження нових та малопоширених кормових, овочевих, зернових і лікарських рослин, агроценози яких завдяки значному адаптивному потенціалу забезпечують високий рівень реалізації продуктивності при мінімальних енергетичних витратах і мають позитивний біогеоценотичний вплив на елементи родючості ґрунту. Враховуючи вищенаведене наголосимо на тому, що проблематика дослідження ринків виробництва амаранту, коноплі та сорго в сучасних умовах господарювання набуває надзвичайної актуальності та вимагає постійних наукових досліджень.

Дослідженню та аналізу ринків виробництва амаранту, коноплі, сорго у своїх наукових працях приділяють увагу такі вітчизняні та закордонні науковці, як: А. Boutin, Renée Johnson, Ж.Ю. Марченко, О.М. Дуда, О.А. Примаков, І.О. Маринченко, С.Ю. Миколенко, А.А. Захаренко та ін.

Ефективне та раціональне застосування рослинних ресурсів – одна з найактуальніших проблем сучасності. Використання нових та модернізованих рослин дає змогу вирішити певні проблеми сільськогосподарського виробництва, ключовою з яких є проблема дефіциту білка. До таких рослин належить амарант – «містичне зерно ацтеків», який протягом тисячоліть був годувальником стародавніх цивілізацій американського континенту – інків і ацтеків [8].

Щорічні аномальні кліматичні умови надзвичайно бентежать вітчизняних аграріїв і примушують їх акцентувати на вирощуванні альтернативних культур. Альтернативним варіантом збереження врожаю в складних посушливих умовах стає включення до сівозміни агропідприємств перспективних посухостійких культур, такою культурою є насамперед амарант.

Як зазначає Олександр Дуда, голова Асоціації виробників амаранта й амарантової продукції: «Середня врожайність амаранта становить близько 2 т/га, однак цей показник не є найвищою врожайністю цієї культури. Потенціал сортів розрахований на 4 т насіння з гектара.

Україна може стати найбільшим виробником амаранта у світі. Собівартість вирощування цієї культури в Україні становить \$ 400/га» [9].

За даними інтернет-видання Agroday: «В Україні у 2017 році площа посівів амаранта становила 250 га, у 2018 році – 800 га. У 2019 близько 4 тис. га, а у 2020 році прогнозувалося її зростання до 20 тис. га. Причиною такого інтересу до амаранта став швидко зростаючий світовий ринок цієї культури, на якому перші отримують максимальні доходи. Тільки амарантової олії у світі продається на \$ 0,5 млрд а попит на неї зростає приблизно на 12% на рік. До речі, українські підприємці налагодили виробництво унікальної олії амаранта холодного віджиму, в якому корисні речовини цієї чудо-рослини зберігаються практично повністю. Також у 2019 році до існуючих 30 агропідприємств, які займалися вирощуванням амаранта, додалися ще 100. При цьому тридцять компаній диференціювали сферу своєї діяльності та зайнялися виробництвом амарантової олії, борошна, крупи, пластівців та іншої продукції з цієї рослини» [10].

У масовій свідомості сучасних українців коноплі міцно асоціюються з наркотичним засобом, тоді як здавна ця рослина обробляється на території України як харчова, кормова та технічна культура. З насіння конопель виготовляють цінну олію, а зі шроту – продукти харчування для худоби. З конопляного волокна виробляють екологічний текстиль, стебло йде на постілку тваринам, мульча – для рослин і навіть на виготовлення будівельних матеріалів.

Ж. Ю. Марченко, О. А. Примаков, І. О. Маринченко зазначають: «Коноплярство є стратегічною галуззю суспільства у світовому масштабі. Воно не лише продукує сировинний матеріал для текстильної промисловості (одягу, канатів, шпагату, мотузок тощо), а й створює стратегічно важливу сировину, що використовується в багатьох сферах економіки: солома, треста, волокно – у виготовленні композитів, нетканих матеріалів, геотекстилю, що застосовуються в різних галузях виробництва; костриця – у меблевій промисловості, у виготовленні паливних пелет, композиційних матеріалів; конопляна олія – у фармацевтичній та харчовій промисловості, у виробництві косметики» [11].

Також важливо зазначити, що вирощування конопель успішно може замінити частину лісових насаджень для виробництва паперу, який має значно вищі показники щодо міцності та зносостійкості і набагато дешевший за традиційний папір з деревинної целюлози. З одного гектара конопель підприємці отримують 6 тонн целюлози на рік, а це значно більше ніж річний приріст одного гектара лісу. Дерева ростуть десятиліттями, а врожай конопель можна зібрати

вже через 120 днів після сівби. Для вирощування лісу потрібні великі ділянки землі, коноплі ж можуть зростати майже скрізь [12].

У світі переробляється 100 % рослини конопель, тоді як в Україні – лише 85 %, решта вважається відходами. Через недосконалість законодавства українські виробники можуть працювати лише з насінням і волокном. Листя та суцвіття технічних конопель не використовують, хоча у світі їх застосовують у фармакології, косметології та харчовій промисловості. Важливою особливістю є те, що коноплі біологічно сумісні з усіма вирощуваними культурами, яким не потрібні добрива [13].

Незважаючи на багатий попередній досвід вирощування і переробки цієї культури, нині ринок технічних конопель в Україні перебуває в занепаді. За інформацією порталу Agravegy.com, площа посівів технічних конопель скоротилася у 2018 році відразу на 60,7% порівняно з 2017 роком, продовжилася негативна тенденція і у 2019 році. Моніторинг ринку технічних конопель показує, що головними негативними факторами впливу на нього є: необхідність отримання ліцензії; відсутність сучасних потужностей з переробки конопляної сировини; низька платоспроможність населення. Динаміку посівних площ технічних конопель в Україні наведено на рис. 1.1.

За даними рис. 1.1 видно, що посівні площі технічних конопель в Україні мають тенденцію до зменшення, які у 2017 році становили 2,8 тис. га, а у 2019–1,02 тис. га. Рівняння параболічного тренду більш чітко відображає тенденцію зміни посівних площ технічних конопель, про що свідчить рівень коефіцієнта апроксимації, який дорівнює 1.



Рис. 1.1. Аналітичне вирівнювання посівних площ технічних конопель в Україні, тис. га

Впроваджуючи коноплі в сівозміну, можна збільшити виробництво кормових культур, поліпшити родючість ґрунту та внести набагато меншу кількість добрив. Серед ідеальних рослин-сусідів для конопель – цукрові буряки, картопля, силосна кукурудза, озимі культури, люпин і конюшина [13]. Основним напрямом бізнесу на ринку технічних конопель є виробництво насіння на експорт. Інша продукція з конопель перебуває в категорії нішевої і не витримує конкуренції з масовим сегментом. Наприклад, конопляна олія має обмежений попит у послідовників здорового способу життя і не може конкурувати за ціною з соняшниковою – пояснюють аналітики [14].

Проаналізувавши ринок технічних конопель в Україні, варто зазначити, що перспективи його розвитку тісно пов'язані зі збільшенням сегмента органічного виробництва та попиту на продукцію у світі. У вітчизняних коноплярів є перспективи збільшення постачання насіння, масла та волокна на платоспроможні ринки Європейського союзу, а також інших країн світу. За умов створення стабільних реалізаційних каналів продуктів коноплярства стане економічно вигідним створення в Україні відповідних переробних підприємств [15].

Під впливом зміни клімату сорго набуває більшої популярності в Україні. Якщо раніше до цієї культури ставилися як до джерела зеленої маси, необхідної для забезпечення потреб тваринництва, то наразі нею зацікавилися виробники зерна. Позитивна тенденція у вирощуванні сорго спостерігається й у світі.

В Україні рід сорго представлений культурними однорічними видами: сорго звичайне, джугара, гаолян, суданська трава. Їх вирощують для забезпечення кормових, технічних та продовольчих потреб. За характером використання розрізняють сорго цукрове, стебла якого застосовують для виробництва патоки, сиропу, силосу; віничне, з волотей якого виготовляють віники та щітки; кормове – для зеленого корму та сіна; зернове – для виробництва круп, борошна, крохмалю, спирту, комбікорму тощо.

Сорго в Україні здебільшого вирощують у степовій зоні. Стримує розширення площі посівів сорго в інших зонах є недостатня сума ефективних температур упродовж вегетаційного періоду. Рекордний урожай сорго, який досяг майже 234 тис. т, вітчизняні аграрії отримали у 2016 році. На це вплинуло розширення посівної площі та понад двотонний рівень урожайності зерна. Після цього відбулося суттєве зменшення виробництва (рис. 1.2).

Площа збирання сорго у 2017 році становила – 71 тис. га, у 2018–41,9 тис. га, у 2019–46,8 тис. га. Урожайність сорго встановлена 2017

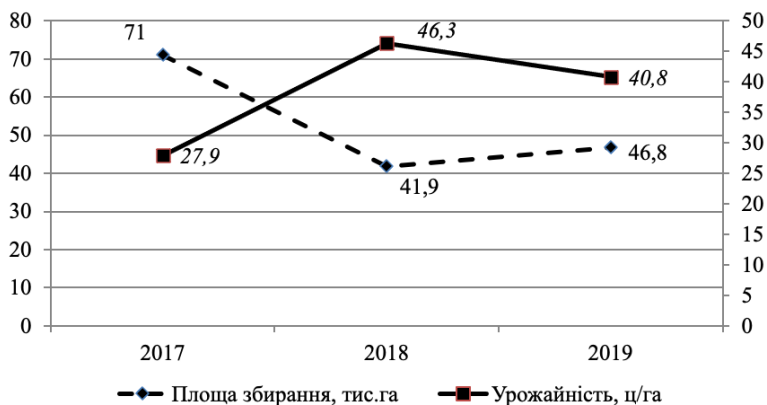


Рис. 1.2. Динаміка зібраних площ та урожайності сорго в Україні

року на рівні 27,9 ц/га, 2018–46,3 ц/га, 2019–40,8 ц/га. Обсяг виробництва сорго зафіксовано 2017 року – 1985,0 тис. ц, у 2018–1939,8 тис. ц, у 2019–1920,3 тис. ц.

Аналізуючи інформацію, надану порталом Agro-business, наголосимо: «сорго є перспективною культурою для України. Силосне сорго здатне задовольняти потреби тваринництва у високоякісному силосі та зеленій масі. Зернове сорго є відмінною альтернативою ячменю, кукурудзі, соняшнику в умовах посушливого клімату Півдня й Сходу України та здатне забезпечувати стійкі високі врожаї» [15].

Підбиваючи підсумки проведеного дослідження, варто наголосити на тому, що виробництво амаранта, коноплі та сорго в сучасних умовах кліматичних перетворень в Україні набуває надзвичайної актуальності. Враховуючи природноресурсний потенціал і позитивну динаміку фінансово-економічних показників, Україна перебуває на шляху розвитку виробництва цих культур, а вітчизняні виробники можуть бути конкурентоспроможними на європейських ринках. Значною перешкодою на шляху розвитку та стимулювання екологічного напрямку виробництва є низький рівень державної підтримки, переважно в частині екологічного законодавства, а також не менш важливим є те, що державну підтримку отримують великі товаровиробники, а не дрібні та середні суб'єкти господарювання. Подальші дослідження спрямовані на проведення маркетингового аналізу щодо використання та корисності вирощування амаранта, коноплі та сорго в Україні.

1.3. Аналіз вітчизняного та закордонного асортименту конопляних харчових продуктів

Автор: Сова Н. А.

Коноплі – рослина, яка має багатоцільове призначення. Практично кожна частина цієї рослини може бути використана в агропромисловому комплексі, харчовій, фармацевтичній, косметичній, текстильній, будівельній, паперовій та інших галузях промисловості.

Традиційно коноплі культивували насамперед як волокнисту культуру для виробництва текстилю та мотузок. Незважаючи на високу поживну цінність, насіння цієї рослини спочатку вважали побічним продуктом, його в основному використовували як корм для тварин. З першої половини XXI століття вирощування цієї культури зменшилось через прогресивну дифузю синтетичних волокон та використання деяких штамів рослини для виробництва наркотичних препаратів. Лише за останні два десятиліття відбулося повторне впровадження вирощування конопель винятково для промислових цілей. У наш час зростає інтерес до насіння конопель завдяки знанням про його високу поживну цінність та потенційну функціональність. Потенційні переваги для здоров'я, які надають коноплі, все ще мають негативну репутацію наркотичних конопель, яка надає сумнівів інтересам та інвестиціям [16].

Основними продуктами переробки насіння конопель є олія, ядро, борошно, клітковина та білковий концентрат. Конопляна олія є перспективним джерелом живлення організму через унікальне співвідношення поліненасичених жирних кислот ω -6: ω -3 як 3:1. Це сприятливо для здоров'я серцево-судинної системи, шкіри, гормонального балансу, діабету тощо. Ця особливість олії сприяє збільшенню промислового виробництва якісних готових продуктів [17]. За результатом нашого аналізу в Україні конопляну олію виробляють 19 підприємств. Серед них ТОВ «Земледар-Інфо» (Івано-Франківська обл.), ТОВ «Агросільпром» (Дніпропетровська обл.), ТОВ Greeny (Рівненська обл.) та інші. В основному конопляну олію отримують пресовим методом. Відходами від виробництва конопляної олії є макуха і фільтрувальний осад. Макуху деякі підприємства переробляють на клітковину, борошно та білковий концентрат, інші реалізують як корм тваринам.

Конопляне борошно виробляють 8 підприємств. Серед них відомі ФГ «Екосвіт», ТОВ «Десналенд» (Сумська обл.) та інші. Конопляне борошно – це продукт подрібнення конопляної макухи або шроту. Його можна використовувати в технологіях хлібобулочних та борош-

няних кондитерських виробів, збагачуючи готові вироби біологічно активними речовинами.

Конопляну клітковину (деякі оператори ринку називають її висівками) виробляють 3 підприємства: ТОВ «Десналенд», ФГ «Екосвіт», (Сумська обл.) та ФОП «Карпов Ю.М.» (Житомирська обл.). Це продукт, отриманий після просіювання подрібненої конопляної макухи. Конопляні висівки використовують як джерело клітковини.

Конопляний білковий концентрат (виробники називають його протеїном) виробляють 11 підприємств, такі як: ТОВ «Павловуд» (Київська обл.), ФГ «Екосвіт», ТОВ «Десналенд» (Сумська обл.) та інші. Це продукт, який все більше набирає попиту серед вітчизняних споживачів. Але є дуже багато питань до складу цього продукту, адже конопляний протеїн, який реалізують в Україні містить від 20 до 50 % протеїну. А споживачі вважають, що протеїну в цьому продукті повинно бути 70–85% як у протеїнах з іншої рослинної сировини. Тому деякі підприємства зараз працюють над удосконаленням наявних або розробкою нових технологій виробництва конопляного протеїну.

Конопляне ядро виробляють 5 підприємств (ФГ «Екосвіт», ТОВ «Десналенд» (Сумська обл.) та інші). Також існують назви «обрушене насіння конопель», «очищене насіння конопель», «лущене насіння конопель». По суті, це конопляне ядро, звільнене від оболонки. Його вживають у сирому вигляді самостійно, як добавку до салатів, а також використовують як сировину для виготовлення харчових концентратів та кондитерських виробів. Крім перерахованих продуктів серед вітчизняного асортименту харчових конопляних продуктів можна зустріти халву з насіння конопель, конопляне молоко, конопляну сіль. Нещодавно в асортименті з'явилися такі продукти, як паста із насіння конопель, конопляне печиво з медом, зернові батончики, кава, шоколад білий конопляний, батончик «Конопля та шоколад».

Також проаналізовано асортимент конопляних харчових продуктів таких країн, як: Канада, Великобританія, США, Німеччина, Данія, Нідерланди та інші. Першою відмінною особливістю від нашого асортименту є органічна конопляна продукція. Крім тих продуктів, які виробляють в Україні, присутні конопляні жувальні цукерки (Канада), смажене конопляне насіння з морською сіллю, конопляні желеїні боби, енергетичний напій, конопляний чай, конопляні жувальні гумки, конопляний мед, кавові зерна та конопляне ядро (США), лагерне конопляне пиво, конопляний протеїновий батончик (Великобританія), конопляні льодяники, конопляний шоколад, конопляні подушечки (Нідерланди). Тому необхідно розширювати асортимент конопляних харчових продуктів в Україні, що забезпечить українців харчовими продуктами оздоровчого призначення в більших обсягах.

Розділ 2. ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ В ХАРЧОВІ ПРОДУКТИ ТА КОРМИ

2.1. Асортимент традиційних продуктів переробки зерна

Автор: Сова Н. А.

Історично склалось, що Україна є основним виробником і постачальником зернової продукції у світі. До зернових належать сільськогосподарські культури різних ботанічних видів. Існує безліч класифікацій зернових культур, але найпоширенішою є класифікація за хімічним складом, відповідно до якої всі зернові культури, які вирощують на території України, поділяють на злакові, бобові та олійні. Зерно злакових культур багате на крохмаль, бобових – на білки, олійних – на жири.

За даними Міністерства аграрної політики та продовольства України у 2022 р. лідерами за обсягами вирощування є пшениця (66,9 млн га), ячмінь (10,6 млн га), ріпак (1,5 млн га), соняшник (4 702,7 тис. га), кукурудза (4 639,4 тис. га), соя (1212,6 тис. га), овес (159,3 тис. га), горох (131,0 тис. га), жито (109 тис. га), гречка (75,3 тис. га) та просо (49,5 тис. га). Інші зернові культури вирощують у значно менших обсягах і їх заведено називати малопоширеними, нетрадиційними або нішевіми. До таких культур належать льон, коноплі, сафлор, гірчиця, амарант, чорнушка, нут, сорго та інші. Нині вітчизняні виробники з метою розширення харчової та кормової продукції і надання їй оздоровчих властивостей усе більше звертають свою увагу саме на нішеві культури.

Наведемо основний асортимент продуктів переробки зерна традиційних культур (табл. 2.1). На формування асортименту борошна впливає вид сировини (види), призначення борошна (типи) та технологія його виробництва (сорти). Формування асортименту круп'яної продукції залежить від виду сировини (види) і технології виробництва, а саме: від термічної обробки (звичайні, зі скороченим часом варіння, швидкорозварювані і такі, що не потребують варіння),

цілісності ядра (неподрібнені, подрібнені і плющені), способу обробки поверхні (нешліфовані і шліфовані), крупності (номери), вмісту доброякісного ядра та домішок (сорти). Асортимент олії формують залежно від виду сировини (види), способів одержання (пресування чи екстракція), очищення (рафінована, нерафінована, гідратована, дезодорована тощо) та якості (сорти) готової продукції.

Велику увагу також приділяють повному використанню сировини, тобто безвідходним технологіям переробки зерна, адже відходи, які залишаються при виробництві борошна, круп, олії та інших продуктів, містять у своєму складі велику кількість корисних речовин і даремно утилізуються, також можна їх застосовувати для технічних цілей.

Таблиця 2.1

Асортимент традиційних продуктів переробки зерна

Культура	Продукти переробки
Пшениця	Борошно хлібопекарське та макаронне різних сортів, крупи: пшенична, манна, «Артек», «Полтавська» різних номерів, олія із зародків, корми для тварин
Ячмінь	Крупи: перлова та ячна різних номерів, борошно продовольче різних сортів, корми для тварин
Ріпак	Олія
Соняшник	Олія, ядро, корми для тварин
Кукурудза	Крупи: кукурудзяна шліфована різних номерів, кукурудзяна на пластівці, кукурудзяна дрібна для паличок, борошно різних сортів, олія із зародків, корми для тварин
Соя	Олія, борошно харчове знежирене, напівзнежирене, не знежирене різних сортів, корми для тварин
Овес	Крупи: вівсяна різних сортів, пластівці, толокно, борошно, корми для тварин
Горох	Крупи: горох лущений цілий та колотий, борошно кулінарне, корми для тварин
Жито	Борошно хлібопекарське різних сортів
Гречка	Крупи: ядриця різних сортів та проділ, борошно дієтичне
Просо	Крупа: пшоно шліфоване різних сортів, корми для тварин

2.2. Технологія виробництва борошна

Автор: Сова Н.А.

Основною сировиною для виробництва борошна є зерно пшениці та жита. Анатомічно зернівка поділяється на три основні частини, які істотно відрізняються як за структурою, так і за властивостями: ендосперм, зародок та оболонки. У процесі виробництва борошна оболонки і зародок повинні бути виділені як самостійні продукти. Так при попаданні оболонок в борошно підвищується його зольність, а при попаданні подрібненого зародка зменшується термін його зберігання.

Ендосперм являє собою внутрішню частину зерна і складається з двох основних частин: алейронового шару та борошністого ядра. Борошністе ядро – центральна і найцінніша в харчовому відношенні частина зерна. Вона заповнена великими та дрібними гранулами крохмалю, між якими знаходяться прошарки білка.

Для виробництва борошна використовують такі види обладнання:

- оббивальні й щіткові машини для очищення поверхні зерна сухим способом;
- мийні машини для вологої обробки зерна;
- обладнання для холодного кондиціювання;
- зволожувальні апарати;
- обладнання для гарячого кондиціювання зерна;
- вальцьові верстати для подрібнення зерна на сортове борошно;
- жорновий посад для плющення і розмелювання зерна;
- молоткові дробарки для виробництва оббивного борошна;
- ентолейтори для проміжного здрібнювання добре збагачених проміжних продуктів, які не мають у своєму складі оболонок;
- вимелювальні машини для забезпечення ефективного вимелювання оболонкових продуктів;
- машини для сортування подрібнених зернових продуктів;
- розсійники для сортування здрібненого зерна;
- віброцентрифуги для висівання борошна з проміжних продуктів розмелювання зерна з великим вмістом висівок;
- ситовійні машини для збагачення вихідних продуктів.

Технологічний процес борошномельного заводу складається з очищення й підготовки зерна до помелу, помелу і сортування продуктів подрібнення, контролю продукції, побічних продуктів та відходів. Технологічні процеси очищення й підготовки зерна до помелу призначені для забезпечення ефективної обробки зернової маси з метою виділення з неї сторонніх домішок, поліпшення технологічних властивостей та підвищення стабільності показників якості зерна.

Очищення й підготовка зерна до помелу включає:

- формування помольних партій зерна (змішування кількох вихідних партій зерна різного за якістю);
- очищення зернової маси від сторонніх домішок;
- очищення поверхні зерна;
- водно-теплову обробку зерна для поліпшення його технологічних властивостей;
- контроль побічних продуктів та відходів.

Помел – це сукупність взаємопов’язаних у певній послідовності технологічних процесів та операцій переробки зерна на борошно заданого виходу. Прості помели – це метод простого здрібнювання, за якого всі анатомічні часточки зернівки здрібнюються рівномірно з максимальним виходом борошна. Своєю чергою прості помели поділяють на помели з послідовним та послідовно-паралельним здрібнюванням зернових продуктів. У складних помелах застосовують зернові продукти з метою вилучення внутрішньої частини зерна – ендосперму, а потім його збагачують та здрібнюють на борошно. Для складних помелів характерне виділення деякої кількості проміжних продуктів та їхня обробка на спеціальній (проміжній) групі систем паралельно з обробкою основного потоку зернових продуктів.

Поживна (харчова) і споживча цінність борошна визначається хімічним складом, а також хлібопекарськими та макаронними властивостями, які, своєю чергою, залежать від технологічних властивостей та умов організації виробництва борошна. Тому борошно одного й того самого сорту, вироблене на різних заводах, неоднорідне за своїми біохімічними та хлібопекарськими властивостями.

Поживна (харчова) цінність борошна, крім хімічного складу, визначається ще й енергетичною цінністю (калорійністю), засвоюваністю та повноцінністю вироблених з неї харчових продуктів.

Щоб забезпечити однорідність виробленого борошна різних сортів, його нумерують за показниками якості: зольність, крупність помелу, вміст та якість клейковини, колір борошна. На борошно-

мельних заводах діє право на виробництво та реалізацію борошна за білістю замість зольності.

Крім обов'язкових застосовують ще й деякі загальні для зернових продуктів показники: вологість, органолептичні показники, вміст мінеральної домішки, якість сирої клейковини у пшеничному борошні, вміст металомагнітної домішки, ураженість і забрудненість шкідниками хлібних запасів, вміст токсичних елементів, мікотоксинів та пестицидів [18].

2.3. Технологія виробництва круп

Автор: Сова Н.А.

Сировиною для виробництва круп є зерно не тільки круп'яних культур – рису, проса, гречки, а й таких культур, як: пшениця, ячмінь, овес, горох, кукурудза.

Для виробництва круп використовують таке технологічне обладнання:

- обладнання для гідротермічної обробки зерна круп'яних культур;
- апарати для пропарювання зерна періодичної і безперервної дії;
- сушарки;
- обладнання для термічної обробки зернової сировини з використанням інфрачервоного енергоприводу;
- плющильні установки;
- машини для луцення, шліфування і полірування (вальцедекові лущильні верстати, лущильні посади, вальцьові лущильні верстати, лущильно-шліфувальні машини, лущильно-шліфувальні посади, шліфувальні машини, бильні лущильні машини);
- дробарки для дроблення крупи;
- дежермінатори для подрібнення зерна кукурудзи на крупу з одночасним відділенням зародка;
- крупосортувальні машини;
- падді-машини для сортування продуктів луцення зерна круп'яних культур;
- розсійники.

Процес переробки зерна в крупи складається з трьох основних етапів: підготовки зерна до переробки, переробки зерна в крупи, фасування та відвантаження готової продукції.

Етап підготовки зерна до переробки включає виділення домішок та водно-теплову обробку. Оскільки всі технології виробництва круп із зерна різних культур обов'язково включають операцію лущення, на круп'яних заводах не застосовують операції обробки поверхні зерна (сухим способом або миття). Застосування водно-теплової обробки зерна підвищує вихід та якість крупи; його рекомендують застосовувати при переробці зерна гречки, вівса, пшениці, кукурудзи та гороху.

Процес переробки зерна включає ряд обов'язкових операцій: лущення зерна, сортування продуктів лущення, контроль готової продукції. При переробці більшості круп'яних культур використовують шліфування та полірування крупи, окрім того, обов'язковою операцією є контроль відходів після сортування продуктів лущення зерна.

Для окремих культур застосовують також операцію подрібнення ядра. Для деяких схем характерна окрема переробка зерна за фракціями крупності, з цією метою застосовують сортування (калібрування) зерна до лущення.

Якість круп повинна відповідати вимогам нормативно-технічної документації як за органолептичними, так і за фізико-хімічними показниками.

Крупку оцінюють за смаком, запахом, кольором, вологістю, вмістом різних домішок, у тому числі й металоманітних, вирівняністю за крупністю, вмістом доброякісного ядра та нелущених зерен. Для окремих видів круп додатково визначають зольність (кукурудзяні крупи та вівсяні пластівці), кислотність (вівсяні пластівці), вміст зародків (кукурудзяні крупи) [18].

2.4. Технологія виробництва олії

Автор: Сова Н.А.

Олієжирова промисловість – складна галузь харчової промисловості, що включає взаємопов'язані процеси переробки насіння олійних культур та виробництв олії, жирів, макухи та шротів, маргарину, майонезної продукції тощо. Олійний ринок України є одним із перспективних секторів аграрного виробництва. Олійна продукція

має зростаючий попит на світовому ринку, що зумовлено двома основними факторами:

- все більшою переорієнтацією в структурі харчування людей на олії і жири рослинного походження через їх фізіологічні переваги та більш доступні ціни порівняно із тваринними жирами;
- динамічним зростанням в усьому світі виробництва біодизельного пального на основі рослинних олій на фоні прогресуючого зростання цін на мінеральні енергоресурси та зменшення їх природних запасів [19].

Основною сировиною для виробництва олій є плоди і насіння рослин, що відносять до групи олійних. Провідною олійною культурою в Україні є соняшник. Крім основних олійних культур, що вирощують у світі та в Україні, таких як соняшник, соя та ріпак, є нішеві культури, які займають значно менші площі. Це такі культури, як льон, гірчиця, сафлор, рижій, кунжут, молочай тощо.

Для збільшення виробництва олієнасіння нішевих культур в Україні є всі умови:

- 1) сприятливі природно-кліматичні умови;
- 2) створені сучасні високопродуктивні сорти;
- 3) розроблені технології вирощування з урахуванням агробіологічних особливостей культур.

Однак відсутність переробки призводить до того, що льон олійний, гірчиця, сафлор в основному експортують у вигляді насіння, що суттєво стримує розвиток ринку цих культур, і вони так і залишаються нішевими.

Насіння сої, ріпаку, гірчиці, льону та рижію переробляють у невеликих обсягах. Також перспективною сировиною для отримання олій є олієвмісні відходи харчових і переробних підприємств (фруктові й виноградні кісточки, висівки та зародки зернових культур, насіння гарбуза, томатів тощо) [19, 20].

Характеристика вмісту ліпідів і білків в насінні та плодах олійних культур наведена в таблиці 2.2 [20].

Перевагами соняшника як олійної культури є:

- великий вміст високоякісної олії в насінні;
- можливість механізації при вирощуванні на незрошуваних землях;

Таблиця 2.2

Вміст жирів і білків у насінні та плодах олійних культур

№ з/п	Назва сировини	Вміст ліпідів,%	Вміст білків,%
1	Насіння соняшнику	52–54	14–16
2	Соя	20	40
3	Насіння льону	47	22
4	Гірчиця	47	22
5	Ріпак	40–46	25–26
6	Насіння рицини	55	20
7	Насіння арахісу	40–60	20–27
8	Насіння конопель	32–48	17–32

- білки насіння соняшнику мають високу поживну цінність, що дає змогу збагачувати кондитерські та хлібобулочні вироби, а також використовувати насіння соняшнику як білковий компонент у рецептурах комбікормів;
- можливість використання кондитерського типу соняшнику для кондитерських виробів (халва, козинаки, смажені ядра соняшнику, замітник горіхів тощо).

Специфічною особливістю сої є присутність у її складі антихарчових речовин – токсичних білків лектинів, інгібіторів харчових ферментів та інших небажаних сполук. Тому при переробці сої необхідні технологічні операції, які інактивують ці сполуки, підвищують поживну та кормову цінність отриманих продуктів.

Особливістю насіння льону є вміст лимарину – сполуки, при гідролізі якої утворюється вільна синильна кислота. Тому переробка льону повинна відбуватися при умовах, які не викликають утворення токсичної синильної кислоти.

Характерною ознакою гірчиці є присутність у насінні глікозинолатів або тіоглікозидів – сполук, які дають гірчичні ефірні олії. Це й визначає використання гірчичного порошку в харчовій промисловості та медицині.

Особливістю нових сортів ріпаку є відсутність ерукової кислоти, вміст якої не давав можливості використовувати ріпак у харчовій промисловості. У насінні ріпаку є глікозинолати, які утворюють при гідратації ефірні олії.

Специфічною особливістю насіння рицини є вміст токсичних сполук, найважливішими є токсичні білки – лектини (рицин) та інші. Для їх знешкодження виконують спеціальну волого-теплову обробку насіння, яка дозволяє після вилучення олії отримати кормовий білковий продукт.

Характерною ознакою насіння арахісу є те, що його білки легко засвоюються організмом людини, але в його складі містяться, як і в білках сої, інгібітори харчових ферментів та інші антихарчові речовини, включаючи лектини [20].

Особливістю сучасних сортів насіння конопель є відсутність тетрагідроканабінолу, що є психотропною речовиною. Насіння промислових конопель відзначається вмістом поліненасичених жирних кислот (співвідношення ω -6 до ω -3 в конопляній олії становить 3:1÷5:1, що рекомендовано ВООЗ ООН для лікувально-профілактичного харчування), а також вітаміном Е (токоферолів) [21].

При переробці насіння олійних культур пильну увагу приділяють його якості, окрім вологості, засміченості насіння визначають кислотне число олії, яка в ньому міститься. Збільшення кислотного числа олії в насінні пояснюють травмуванням під час механічного впливу на насіння і процесом окиснення олії в мікротріщинах насіння. З цих причин недоцільно використовувати травмоване насіння олійних культур, а також довгого терміну зберігання [22].

Олію з насіння отримують двома способами: механічним, в основі якого лежить пресування подрібненої сировини, та хімічним (екстракційним), при якому спеціально підготовлену сировину обробляють органічними розчинниками.

Основним способом переробки насіння соняшнику на великих промислових підприємствах є екстракційний, за яким олію добувають методом механічного тиску з подальшою екстракцією розчинником. Технологічна схема мініолійниці ґрунтується на пресовому способі.

Перед вилученням олії сировину очищують від мінеральних та органічних домішок. Цю технологічну операцію проводять з метою збільшення виходу олії, підвищення її якості, а також збереження обладнання. Для очищення застосовують сепаратори та магнітні апарати. Далі проводять обрушування оболонки (шеретування). Відділення оболонки від ядра складається з операції руйнування покривних оболонки насіння – обрушування і наступного розділення одержаної суміші на ядро та лузгу. Для обрушування застосовують оббивальні машини (рушанки). Для добування олії з насіння необхідно зруйнувати його клітинну структуру. Кінцевий результат опе-

рації подрібнення – перехід олії, що міститься в клітинах насіння, у форму, доступну для подальшого технологічного обробітку. Не всі олійні культури подрібнюють перед вилученням олії, це залежить від крупності сировини та її анатомічної будови. Для одержання м'ятки застосовують двох-, чотирьох- та п'ятивальцьові верстати. Найчастіше застосовують п'ятивальцьовий верстат.

Олія, адсорбована у вигляді тонких плівок на поверхні частинок подрібненого ядра м'ятки, утримується значними поверхневими силами. Для ефективного добування олії необхідно їх зменшити. Це здійснюється за допомогою гідротермічної обробки м'ятки (приготування м'ятки піджарюванням). Для приготування мезги застосовують жаровні, які за конструктивними особливостями поділяють: на чанні, шнекові, барабанні.

Добування олії з мезги здійснюють способами пресування або екстракції. Пресування як спосіб добування олії з насіння здійснюється безпосередньо для одно- або двократного пресування мезги з метою одержання олії, а також може передувати остаточному знежирюванню матеріалу органічним розчинником – екстракції. Для пресування насіння олійних культур використовують шнекові або гідравлічні преси. Шнекові преси, своєю чергою, поділяють на форпреси та експеллери. Форпреси найширше застосовують у технологічних схемах екстракційних заводів. Вони відрізняються високою продуктивністю (80 т за добу в розрахунку на насіння) при порівняно не високому добуванні олії (олійність макухи до 15–17%). Частота обертання шнека форпреса становить 18–36 об/хв, товщина макухи (черепашки) – 8–12 мм, тривалість пресування – приблизно 80 с.

Преси глибокого добування олії мають значно меншу продуктивність (18–30 т за добу). Проте олійність макухи вони доводять до 4–7%. Це досягається завдяки більш тривалому пресуванню мезги 220–225 с внаслідок меншої частоти обертання шнека (5–18 об/хв) і невеликої черепашки, що виходить із преса (3–5 мм) [18].

Раніше досить широко використовували гідравлічні преси. Через конструкційні недоліки на сьогодні їх повністю витіснили шнекові преси. Але існує думка операторів ринку, що пресування олії на гідравлічному пресі, дозволяє отримати продукцію кращої якості, ніж на шнековому пресі. Тому останнім часом багато підприємств малої потужності почали використовувати дерев'яні гідравлічні преси.

Для підприємств більшої потужності виробники обладнання для виробництва олії пропонують гідравлічні преси продуктивністю 30–40 кг/год. Ці гідравлічні преси оснащені фільтрами, що дозволяє

одразу проводити фільтрування рослинної олії. Обладнання оснащено двома резервуарами для збирання олії. Процент віджимання становить 93–95 % за один цикл, що зменшує собівартість готової продукції, а також зберігає корисні властивості рослинної олії.

Екстракція дозволяє забезпечити майже повне добування олії. У відходах, які називають шротом, залишається до 1% олії. Для збільшення поверхні дотику з розчинником форпресовій макусі надають форми тонких пластинок (пелюсток) товщиною 0,25–0,50 мм, пропускаючи її через спарену плющильну вальцівку з гладенькими вальцями. Як розчинник для екстракції олії застосовують бензин марки А і Б та гексан.

У сирих оліях завжди містяться різноманітні домішки. Частина їх разом з олією витягується із клітин насіння під впливом підвищеної температури, тиску та органічного розчинника. Тому в товарній олії завжди наявні фосфоліпіди, воски, барвні речовини і продукти розкладу цих речовин (вільні жирні кислоти, моно- і дигліцериди та інші речовини). В олії, одержаній із насіння, є також продукти окиснення різних сполук ліпідної природи. Вміст їх залежить від якості насіння та інтенсивності технологічного впливу на насіння при одержанні олії. Крім розчинних речовин, товарна олія містить і механічні домішки.

Процес очищення олії від супутніх речовин одержав назву рафінації. Методи рафінації можуть бути розділені на фізичні, хімічні та фізико-хімічні. Вибір методу рафінації залежить від складу і якості домішок, їх властивостей та призначення олії. У більшості випадків очищення олії досягається поєднанням декількох методів.

Фізичні методи застосовують при первинному очищенні олії, а також для видалення нерозчинних в олії частинок, які утворюються в процесі рафінації. Видалення з олії твердих частинок мезги відбувається відстоюванням, центрифугуванням та фільтруванням. За допомогою хімічних і фізико-хімічних методів рафінації з олії видаляють вільні жирні кислоти, фосфоліпіди, білки, слиз і деякі інші сполуки. До цих методів за цільовим призначенням відносять гідратацію, нейтралізацію, адсорбційну рафінацію, дезодорацію, виморожування. Під час виробництва олії основними відходами є макуха та шрот. Традиційно це високобілкові цінні концентровані корми для тварин, які використовують для виробництва комбікормів. У макусі міститься значна кількість білків, жиру, зольних речовин. Шрот відрізняється низькою олійністю (до 1%), тому його кормова цінність нижча. За загальною поживністю макуху та шрот прирівнюють до зернових культур [18]. Також шрот і макуху після виробництва

рослинних олій можна використовувати для харчування. макуху або шрот подрібнюють, розділяють на різні за крупністю фракції і одержують борошно, протеїнові добавки і клітковину. Ці продукти застосовують як збагачувачі для виробництва кондитерських та інших виробів з метою одержання харчових продуктів оздоровчого призначення.

Технологічна схема виробництва олії пресовим способом наведена на рис. 2.1. До показників якості рослинних олій відносять органолептичні показники якості, вміст вологи і летких речовин, кількість відстою в олії, кислотне, йодне, пероксидне, анізидинове числа та число омилення [18].

Якісний і кількісний склад ліпідів і супутніх сполук оліє-білкової або білково-олійної сировини змінюється на тривалому шляху від збирання, транспортування і зберігання насіння до його комплексної переробки, з урахуванням різних хімічних і технологічних впливів. Хімічний склад ліпідів пресових олій і макухи визначає їхню якість, еколого-економічну ефективність, функціонально-технологічні і спеціальні властивості та біологічну цінність для споживачів [21].

Для визначення цінності рослинних олій визначають їх жирно-кислотний склад (табл. 2.3) [23].

Рослинні олії також багаті на вітамін Е (токофероли). Наведемо дані про вміст вітаміну Е в деяких рослинних оліях (табл. 2.4).



Рис. 2.1. Технологічна схема виробництва олії

Таблиця 2.3

Порівняльний вміст жирних кислот у рослинних оліях

№ з/п	Назва олії	Вміст кислоти у% відносно загальної кількості жирних кислот		
		Олеїнова (Омега-9)	Лінолева (Омега-6)	Ліноленова (Омега-3)
1	Соняшникова	54,1	12,5	0,0
2	Конопляна	16,2	54,8	14,8
3	Ляна	20,1	14,6	55,5
4	Сафлорова	75,2	12,8	0,0
5	Кукурудзяна	56,4	0,4	1,1
6	Гарбузова	55,7	0,6	0,4
7	Кедрова	42,4	19,9	0,3
8	Соєва	21,7	54,1	0,6
9	Ріпакова	60,2	20,5	8,0
10	Гірчична	42,1	27,8	10,1
11	Пшенична	15,4	52,3	8,1
12	Горіхова	20,5	57,5	10,5
13	Рижієва	15,7	19,6	32,9
14	Маслинова	69,9	12,6	0,7
15	Коріандрова	66,1	17,2	0,6
16	Кокосова	7,8	1,7	0,0
17	Пальмова	38,6	9,9	0,0
18	Бавовняна	19,0	54,0	1,0
19	Арахісова	46,5	31,4	0,0
20	Олія авокадо	0,0	12,5	1,0
21	Олія канולי	61,8	18,6	9,1
22	Олія з виноградних кісточок	14,3	74,7	0,0

Таблиця 2.4

Вміст токоферолів у конопляній пресовій, соняшниковій, кунжутній та амарантовій оліях

Олія	Загальний вміст, мг%	Ізомери, % від загального вмісту			Інтервал вмісту, мг% ^a
		α	β	γ+δ	
Соняшникова високоолеїнова рафінована	96±0,85	91,5±0,8	8,5±0,05	-	40,3–102,1
Кунжутна нерафінована	84±0,7	51,4±0,55	43,0±0,4	5,6±0,05	50,4–114,0
Амарантова рафінована	215±1,5	49,1±0,35	42,4±0,5	8,5±0,1	31,4–347,2
Конопляна пресо́ва нерафінована	562,8	41,6	48,6	9,8	-

^a За Codex Alimentarius.

Важливим є питання зберігання рослинних олій. Ацилгліцероли в рослинних оліях нестійкі при зберіганні. Вони є найбільш лабільними компонентами олієжирової сировини (насіння, напівпродуктів) і готових харчових продуктів. Нестійкість олій і жирів – наслідок особливостей їхньої хімічної будови. Перетворення триацилгліцеролів можливо розділити на реакції, які протікають за участю складних ефірних груп, і на реакції, які протікають за участю вуглеводневих радикалів.

В основі окиснення ліпідів і олій лежить їхня взаємодія з киснем, швидкість їхнього окиснення індивідуальна та залежить від багатьох факторів. Субстратами цієї реакції в загальному вигляді є ненасичені жирні кислоти. Ліпіди тканин олійної сировини, особливо на початку зберігання, підлягають біохімічним змінам.

Триацилгліцероли ненасичених жирних кислот окиснюються швидше ніж насичені жирні кислоти. Вільні жирні кислоти окиснюються швидше ніж у складі триацилгліцеролів. Окиснення жирних кислот належить до складних багатоступеневих процесів. Здатність до окиснення збільшується в міру насиченості і знижується в міру збільшення кількості атомів вуглецю в молекулах жирних кислот.

Насичені жирні кислоти окиснюються тільки за температури понад 60 °С, тоді як поліненасичені жирні кислоти окиснюються навіть у замороженому стані. Можливі аналогічні реакції окиснення й в інших ненасичених субстратах: фосфоліпідах, вуглеводнях, сквалени, вітаміні А та каротиноїдах, вітаміні Е. Слід підкреслити, що

вітамін Е як натуральний антиокиснювач затримує окиснення ліпідів та формування летких сполук.

За поглинанням кисню виділяють три періоди: індукційний, мономолекулярний (у кінці цього періоду з'являється смак прогірклості), нарешті, бімолекулярний, коли інтенсивність поглинання кисню різко зростає. Спонтанне самоокиснення ліпідів (олій) відбувається завжди, навіть за умов їхнього зберігання в охолодженому стані, захищеними від світла, у неметалевих контейнерах. Це відбувається тому, що завжди є молекули з енергією більшою ніж у середньому в системі. Швидкість окиснення залежить від вмісту в системі антиокиснювачів. Дуже часто зниження швидкості реакцій ініціювання є обмежувальним фактором в окисненні ліпідів [21].

2.5. Технологія виробництва комбікормів

Автор: Сова Н. А.

Ріст, розвиток і продуктивність сільськогосподарських тварин, птиці та риби значною мірою залежить від їх годування. Тому розвиток інтенсивного тваринництва, птахівництва, рибництва ґрунтується на ефективності використання поживних речовин та кормових засобів за їх мінімальних витрат на одиницю продукції.

Повноцінне годування можливе лише за збалансованості раціонів, які мають задовольняти потреби тварин у поживних, мінеральних та біологічно активних речовинах. Використовуючи різний склад кормів, можна отримати суміш, в якій вміст поживних речовин буде в необхідній кількості та співвідношенні.

Основою кормів є комбікорм – однорідна суміш очищених та подрібнених до певного ступеня різних кормових засобів, складених за науково обґрунтованими рецептами. Вони передбачають необхідне поєднання різноманітних компонентів, що забезпечує найефективніше використання поживних речовин.

Для виробництва комбікормів використовують широкий асортимент кормових засобів, мінеральних продуктів та біологічно активних речовин.

До основної сировини належать зерно та побічні продукти зернопереробних підприємств – висівки, лузга та ін. У зерні хлібних і круп'яних культур міститься багато вуглеводів, але недостатньо протеїну. Один із найкращих компонентів комбікормів – кукурудза. Залежно від корму і виду тварин застосовують ячмінь, овес, пшеницю, просо, сорго, жито, бобові культури.

Також до складу комбікормів вводять побічні продукти та відходи харчових виробництв (борошномельного, круп'яного, олійного, цукрового, крохмале-патокового, спиртового, пивоварного), корми тваринного походження (борошно, отримане з відходів під час переробки м'яса, риби, морських тварин), кормові дріжджі, трав'яне борошно, грубі корми (сіно, солома), карбамід (синтетична сечовина), мінеральні речовини (кухонна сіль, крейда, вапняк, кормові фосфати та інша сировина мінерального походження), мікродобавки (вітаміни А, D, Е, В₁, В₂, В₃, В₄, В₆, В₁₂, С), мікроелементи (марганець, залізо, мідь, кобальт, цинк, йод), незамінні амінокислоти (препарати кормового лізину і метіоніну), ферменти (зокрема амілолітичні), антиокиснювачі та іншу сировину.

Комбікормові заводи виробляють такий основний асортимент продукції: кормові суміші, комбікорми-концентрати, повнораціонні комбікорми, білково-вітамінні добавки, премікси, карбамідний концентрат.

Комбікорми виробляють за рецептами, в яких зазначають найменування компонентів та їх співвідношення у відсотках. Залежно від виду тварин кожному рецепту присвоєно номер.

Для виробництва кормових розсипних сумішей компоненти, кожний окремо, очищають від домішок, лущать та подрібнюють на молоткових дробарках до певної крупності. Підготовлені компоненти дозують (об'ємним або ваговим методом) та змішують у шнекових змішувачах. Отриманий продукт фасують у мішки або зберігають у розсипному вигляді. Брикетовані комбікорми виробляють для жуйних тварин. У рецептуру деяких із них входять подрібнене сіно та солома. Суміш подрібнених компонентів подають у спеціальний змішувач, де їх змішують з дозованою в необхідній кількості мелясою, що подається в розпиленому стані. Добре перемішана маса спрямовується на преси для брикетування. Отриманий брикет має восьмикутну форму завдовжки 160–170 мм, завширшки 70–80 мм та завтовшки 30–60 мм.

Гранульовані комбікорми випускають переважно у вигляді повнораціонних для годівлі всіх видів тварин, птиці та риби. Розміри гранул залежать від виду та віку тварин, способів годування. Для дорослої птиці (курей, качок, гусей, індичок) діаметр гранул становить 4,7–9,7 мм, дорослої великої рогатої худоби – 4,7–19,0 мм, риб – 4,7 мм і т.д. Для молодяку птиці гранульовані комбікорми випускають у вигляді крупки.

Комбікорми гранулюють сухим та вологим способами. Сухим способом однорідну суміш технологічно підготовлених компонентів змішують із розпиленим рідким компонентом (мелясою, солоним гідролом, рибним жиром та ін.). Після чого суміш іноді обробляють паром, потім пресують, нарізають на частини (гранули) та охолоджують.

Дрібні гранульовані комбікорми (крупки діаметром 2–3 мм) отримують після подрібнення великих гранул (діаметром 4,7–9,7 мм) з наступним калібруванням на ситах. При цьому частина гранульованого матеріалу перетворюється на борошністу фракцію, яку відсіюють та спрямовують на повторне пресування. За вологого гранулювання у розсіпний комбікорм доливають гарячу воду та замішують тісто. Потім його пресують, нарізають на гранули, висушують та охолоджують.

Гранули кожного комбікорму повинні мати певну міцність як під час зберігання, так і під час транспортування (пересипання). Гранульовані комбікорми для годівлі риби повинні бути водостійкими та поступово розпадатися у воді. Для цього в комбікорми вводять спеціальні речовини (альбумін, казеїн), на поверхню гранул наносять водовідштовхувальні сполуки або проводять спеціальну обробку гранул, розбризкуючи на них жир, розчинений крохмаль та полівініловий спирт.

Під час виробництва комбікормів сировину використовують майже повністю, кількість відходів, механічні втрати та усихання дуже незначні. Норма якості комбікормів встановлена у відповідних стандартах, якісні показники залежать від виду, віку та господарської спрямованості тваринництва.

Комбікорми – це складні суміші, тому їх зберігати важче, ніж зерно, борошно, крупу. Це пояснюють великою кількістю компонентів, що входять до їх складу і надають їм специфічних фізичних, хімічних та біологічних властивостей. Стійкість комбікорму під час зберігання залежить від якості та кількості компонентів.

Завдяки гігроскопічним властивостям комбікорми істотно змінюють вологість. Особливо швидко це відбувається в розсіпних кормах. Сорбція або десорбція водяної пари найінтенсивніше відбувається впродовж перших 3 діб і завершується через 10–14 діб. Сорбційні властивості найкраще виявляються у поверхневих шарах. Швидкість проникнення вологи в насип залежить від гранулометричного складу комбікорму та його шпаруватості. Серед факторів навколишнього середовища на зберігання комбікормів найбільше впливає температура. Зберігання комбікормів за знижених температур з вологістю нижчу за критичну значно збільшує термін безпечного зберігання. Залежно від

температури (5–20 °C) і вологості (11–18%) термін стійкого зберігання змінюється від 4 до 120 діб і більше. Значний вплив температурного фактору пояснюється тим, що основна причина зниження якості та псування комбікормів – активний розвиток мікрофлори та шкідників. Окиснювальні процеси, що відбуваються в комбікормах, інтенсивно протікають за більш високих позитивних температур.

Мікрофлора комбікормів переважно складається з мікроорганізмів, що населяють зернову масу. Загальна чисельність мікроорганізмів перевищує вміст їх у зерновій масі, оскільки висівки та трав'яне борошно досить насичені мікроорганізмами.

Усі комбікорми є поживним середовищем для багатьох бактерій, зокрема плісневих грибів. За наявності достатньої кількості вологи (на рівні критичної і більше) і плюсових температур (10–20 °C і вище) плісені дуже швидко розвиваються, виділяють багато теплоти та є основною причиною самозігрівання. Велика шпаруватість розсипних (56–58%) та гранульованих (50–54%) кормів забезпечує запас повітря (а в ньому кисню), необхідного для інтенсивного розвитку аеробної грибно-мікрофлори.

Бактерій у розсипних комбікормах міститься значно більше, ніж у гранульованих. Цьому сприяє вплив високих температур у процесі гранулювання.

На самозігрівання і псування комбікормів значно впливають кліщі та комахи. Комахи добре розмножуються навіть у комбікормах з низькою вологістю та на всіх ділянках насипу. Єдиний фактор, що обмежує їх розвиток, – знижена температура (нижче ніж 10 °C). Тому захист комбікормів від попадання і розвитку в них шкідників – дуже важливий захід, оскільки знезараження їх досить складне, а іноді й неможливе.

Зберігають комбікорми насипом або в тарі в сухих сховищах (відносна вологість повітря не вища ніж 70–75%) без ознак ураження шкідниками хлібних запасів.

За станом комбікормів систематично спостерігають, вимірюючи температуру у сховищі та в масі продукту, визначають його вологість та титровану кислотність. Виявляють ознаки ураження сховища та комбікормів шкідниками. Зазначені показники контролюють і в разі зберігання сировини, яку використовують для виробництва комбікормів.

Існує спосіб консервування комбікормів – зберігання їх і трав'яного борошна в атмосфері азоту та діоксиду вуглецю, оскільки безкисневе середовище значно скорочує втрати каротину та гальмує окиснювальні процеси [18].

2.6. Технологія безвідходної переробки зернової сировини в корми

Автори: Алієв Е. Б., Малєгін Р. Д.

Найважливішим чинником успіху виробництва тваринницької продукції є створення міцної кормової бази для забезпечення потреб галузі тваринництва. Органічне тваринництво, яке набуло особливої уваги, передбачає використання екологічно чистих кормових компонентів, які доцільно доставляти тваринам у необхідній кількості. Забезпечення такого стабільного функціонування органічного сектору тваринницької галузі України потребує розробки комплексів адекватних моделей розвитку органічного кормовиробництва та виявлення базових закономірностей впливу технологій кормозабезпечення на органічність корму для задоволення потреб у кормах органічного тваринництва, що є необхідним й актуальним завданням [24–26].

Розробка нового техніко-технологічного забезпечення кормовиробництва для органічного тваринництва повинна проводитися з урахуванням їх екологічності. Нове забезпечення кормовиробництва оцінюється згідно з розробленими для органічного тваринництва критеріями ефективності, ресурсо- і енергоощадності та конкурентоспроможності продукції тваринництва в напрямі підвищення якості кормової бази за допомогою технологічних і технічних новацій [27].

Окрім зернових культур великий кормовий потенціал мають олійні культури (льон олійний, сафлор, кунжут та ін.) і продукти їх переробки. Їх фізико-хімічний склад є досить унікальним: достатньо високий вміст протеїну, великий спектр жирних кислот і вітамінів [28, 29]. Тому актуальним завданням підвищення якості кормової бази є створення новітнього техніко-технологічного забезпечення для безвідходної переробки рослинної сировини олійних культур у корми для органічного тваринництва.

Сучасне техніко-технологічне забезпечення для переробки рослинної сировини олійних культур зводиться до процесу отримання олії і макухи (вміст протеїну – 19–24 %, вміст жиру – 9–13 %), подальшого подрібнення макухи і введення її в комбікорми [30]. Використання макухи для годівлі свиней і птиці неефективне через підвищений вміст клітковини (16–19 %), тому для поліпшення поживної цінності й розширення сфери використання високолушпинної макухи для годівлі всіх видів тварин і птиці необхідна додаткова операція з розділення її на білкову й лушпинну фракції. Білкова фракція (вміст

протеїну – 34–38 %, вміст клітковини – 4–6 %) може бути використана на кормові цілі, а лушпинна (вміст протеїну – 2–5%, вміст клітковини – 38–40 %) – як сировина для твердого біопалива (паливних брикетів). В Інституті олійних культур НААН розроблена технологія переробки макухи з насіння олійних культур з отриманням протеїнових добавок та твердого біопалива з лушпинної фракції [30]. Технологія зводиться до таких операцій технологічного процесу: видавлювання олії й отримання макухи на прес-екструдері; подрібнення макухи молотковою дробаркою; механічне фракціонування на щітковому роторному просіювачі; отримання кормових гранул із просіяної білкової фракції на грануляторі; отримання паливних брикетів з лушпинної фракції на прес-брикетувальнику.

Ця технологія лише частково вирішує питання безвідходності переробки рослинної сировини олійних культур. Виникає необхідність не тільки в сухих гранульованих кормах для птиці, але й у рідких кормах для свиней. Також залишається без уваги фуз, отриманий після фільтрації олії. Висока кормова цінність фуза обумовлена високим вмістом протеїну (23–26%) та жиру (43–47%) і низьким вмістом клітковини (7–10%).

У зв'язку з цим виникає необхідність в удосконаленні розробленої технологічної лінії в напрямі приготування рідких кормів для свиней.

Аналіз використання рідких кормів для відгодівлі свиней дозволив виділити такі переваги:

- рідкі корми є більш нативними фізіологічним потребам тварини;
- у процесі приготування й роздавання є можливість поступово замінювати раціон тварини;
- під час приготування й роздавання можна застосовувати прецизійне дозування корму і його компонентів;
- можливість прецизійного внесення мікродобавок, преміксів, медикаментів тощо;
- незначні втрати корму;
- можливість не використовувати напувалки;
- коефіцієнт конверсії корму порівняно із сухими кормами знижується до 10%;
- зменшується кількість гною, що позитивно впливає на економічні та екологічні аспекти виробництва;
- можливість одночасно застосовувати різні раціони для різних груп тварин, які перебувають в одному приміщенні;

- висока швидкість доставки рідкого корму за допомогою трубопроводів;
- гнучкий процес рідкої годівлі, є можливість оперативно корегувати раціон безпосередньо під час роздавання;
- при рідкій годівлі зменшуються затрати праці на 25 %, витрати електроенергії на 20 %, менший вплив людського фактору на процес приготування і роздачі;
- можливість ферментації кормової суміші, що підвищує біодоступність речовин.

Однак зазначені переваги з'являються лише в результаті якісного приготування рідкого корму, а саме забезпечення його структурності й однорідності в усьому об'ємі. Цього можна досягти шляхом впровадження технології диспергування (або гомогенізації) з використанням кавітаційної обробки. Згідно з дослідженнями [31] саме кавітаційне диспергування рідких кормів дозволяє отримати приріст живої маси свиней на відгодівлі – на 10–15 %, збільшення молочності свиноматок – на 9–13 %, виключений прохолост – до 5 %.

У процесі кавітаційного диспергування компонентів кормів відбувається часткове руйнування клітковини й целюлози, розщеплення білка до амінокислот й олігопептидів, які всмоктуються в кров, минаючи ферментативну систему тварини [32]. У варіантах переробки зернових і олійних культур крохмальні зерна перетворюються в цукри, відбувається емульгація жирів, створюються стійкі з'єднання молекул поживних речовин з молекулами води (рис. 2.2).

Водночас переробка корму на кавітаційних установках не призводить до жорсткої зміни білкового комплексу, характерного для інших типів термічних обробок, зберігаються натуральні вітаміни й ферменти (амілаза). У результаті виробляються гомогенні кормові суміші з оптимальною для травлення тварин вологістю (69–72 %) і дисперсністю (0,6–1,2 мм) [33].

Зокрема, в кормових сумішах, що готують з компонентів у нативному вигляді (зерно злакових, бобових та ін.), зберігається жива субстанція (гормони, ферменти тощо) [34, 35]. У процесі обробки вони позбавляються олігосахаридів й антиметаболітів. Кормові суміші виробляються в пастеризованому вигляді й готові до вживання.

На підставі вищезазначеного зроблено такі висновки:

- виробництво рідких кормів і кормових добавок на основі кавітаційної диспергації є ефективним, з точки зору економіки передовим методом, що забезпечує покращення біологічних і хімічних якостей кормів;



Рис. 2.2. Ефективність кавітаційного диспергування рідких кормів

- метод дозволяє застосовувати весь спектр компонентів рослинної сировини;
- отримати гомогенну рідку кормову суміш з добрими органолептичними якостями внаслідок зміни поживних речовин (вуглеводів, білків, клітковини тощо);
- кавітаційна обробка м'яко діє на протеїновий комплекс рослинної сировини, що забезпечує високий ступінь емульгації жирів, який сприяє збільшенню його перетравлюваності тваринами (на 6,3%);
- збільшується доступність мономірних елементів шляхом зниження ефекту важкоперетравності клітковини;
- збільшується екстракція біологічно активних речовин та розчинних білків;
- збільшується засвоюваність трав'яного корму та його загальна біологічна цінність;
- спрощується технологічний процес виробництва білково-вітамінного трав'яного корму;
- зменшуються втрати поживних речовин;
- знижуються енерговитрати при виробництві білково-вітамінного трав'яного корму;
- збільшується до 70% вміст протеїну через білки жомової частини;

- технологія кавітаційної обробки всієї маси рослинної сировини забезпечує позбавлення від необхідності переробки жому;
- кавітаційний ефект при диспергуванні зеленої маси забезпечує максимальне екстрагування компонентів із рослинних клітин;
- кавітаційна обробка доречна для зеленої маси і для білкової частини компонентів (пивна дробина, меляса, відходи спиртопереробної промисловості тощо);
- можна стверджувати про високу ефективність кормів, які біохімічно підготовлені для згодовування сільськогосподарським тваринам всіх видів.

Вищезазначені переваги процесу диспергування рідких кормів дозволяють включити їх до технологічної лінії комплексної безвідходної переробки рослинної сировини олійних культур у корми для органічного тваринництва (рис. 2.3).

Запропонована лінія включає такі етапи технологічного процесу. З товарного насіння олійних культур за допомогою пресу отримуємо нефільтровану олію й макуху. Нефільтрована олія проходить через лінію фільтрації, в результаті чого виділяється очищена олія, яка йде на продовольчі цілі й фуз, який використовується як високопоживна кормова добавка. Макуха подрібнюється й розділюється на дві фракції: білкова й лушпинна. Лушпинна фракція використовується як один із компонентів для виготовлення паливних брикетів, а білкова



Рис. 2.3. Удосконалена технологічна лінія комплексної безвідходної переробки рослинної сировини олійних культур у корми для органічного тваринництва

фракція може використовуватися як компонент при отриманні сухих кормових гранул. Також білкова фракція разом із фузом, фуражним зерном, зерновідходами і преміксами з використанням кавітаційного диспергатора перероблюється в рідкий корм.

Згідно з рис. 2.3 технологічна лінія комплексної безвідходної переробки рослинної сировини олійних культур у корми для органічного тваринництва повинна мати у своєму складі таке техніко-технологічне забезпечення: подрібнювач і просіювач макухи, гранулятор для виробництва сухих кормових гранул, диспергатор для виробництва рідкого корму.

Порівняння удосконаленої технологічної лінії комплексної безвідходної переробки рослинної сировини із базовою, розробленою в Інституті олійних культур НААН, проведено на основі техніко-економічної оцінки. Технічна характеристика обладнання представлена в табл. 2.5.

За вихідні дані прийнято: вартість 1 кг насіння льону олійного – 12,5 грн/кг; вартість 1 кг лаяної олії – 60 грн/кг; вартість 1 кг рідкого корму – 8,6 грн/кг; вартість 1 кг брикетів – 2,2 грн/кг; вартість 1 кг кормових пелет – 7,9 грн/кг; вартість 1 кг води – 0,05 грн; вартість 1 кВт електроенергії – 1,81 грн; тарифна ставка робітника – 25 грн/год.

У результаті техніко-економічного розрахунку отримані дані, які зведені у табл. 2.6. Як бачимо, сукупні питомі затрати для базової й удосконаленої технологічних ліній майже однакові: 14,37 грн/кг і 14,38 грн/кг відповідно. Водночас питомий прибуток вищий в удосконаленої технологічної лінії і становить 5,41 грн/кг, що на 2,15 грн/кг вище ніж у базової.

Таблиця 2.5

Технічна характеристика обладнання

Технологічна лінія	Присутні в обох варіантах					Базова	Удосконалена
	Транспортер для преса	Пресекструдер	Лінія фільтрації	Транспортер для дробарки	Молоткова дробарка		
Показник						Гранулятор	Диспергатор
Марка	ШТ-3	ММШ-60	ЛФ-2	ШТ-3	ДМ-800	Г-200	РДН-2
Продуктивність, кг/год	3000	60	70	3000	800	200	2000
Потужність, кВт	2,2	7,5	2,2	2,2	7,5	7,5	4
Вихід олії	0	0,25	0	0	0	0	0
Ціна, грн	10 000	57800	37200	10 000	14 800	30 500	69 200

Таблиця 2.6

Результати техніко-економічного розрахунку удосконаленої і базової технологічних ліній комплексної безвідходної переробки рослинної сировини олійних культур у корми для органічного тваринництва

Показник	Базова технологічна лінія	Удосконалена технологічна лінія
Маса насіння, кг	1000	1000
Маса отриманої олії, кг	250	250
Маса фуза, кг	25	25
Маса отриманої макухи, кг	725	725
Маса води, кг	0	206,25
Маса білкової фракції, кг	181,25	181,25
Маса рідкого корму, кг	0	412,5
Маса лушпинної фракції (брекетів), кг	543,75	543,75
Сукупні експлуатаційні затрати, грн	872,42	864,83
Питомі експлуатаційні затрати, грн/кг	0,87	0,86
Вартість насіння, грн	12500,00	12500,00
Вартість отриманої олії, грн	15000,00	15000,00
Вартість рідкого корму, грн	0	3584,63
Вартість кормових пелет, грн	1431,88	0
Вартість брикетів, грн	1196,25	1196,25
Вартість води, грн	0	10,31
Питома вартість отриманої олії, грн	15,00	15,00
Питома вартість кормових пелет, грн	1,43	3,58
Питомі затрати на логістику, грн/кг	1,20	0,80
Питома вартість брикетів, грн	0,80	1,20
Затрати на логістику, грн	800,00	800,00
Вартість отриманої продукції, грн	17628,13	19780,88
Питома вартість отриманої продукції, грн/кг	17,63	19,78
Сукупні затрати, грн	14372,42	14375,14
Сукупні питомі затрати, грн/кг	14,37	14,38
Прибуток, грн	3255,70	5405,73
Питомий прибуток, грн/кг	3,26	5,41

Розділ. 3

ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПЕРЕРОБКИ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ В ХАРЧОВІ ПРОДУКТИ Й КОРМИ

3.1. Чарунковий циліндричний трієр для підготовки зернових компонентів

Автори: Алієв Е. Б., Лупко К. О.

3.1.1. Аналіз конструкцій трієрів для сепарації зернових компонентів

Підготовка зернових компонентів суміші включає очищення зерна від домішок рослинного і не рослинного походження [36–38]. Відмінною фізичною характеристикою в чарунковому циліндрі є довжина зернових компонентів суміші. Зазвичай зернові компоненти, що направляється до машини, розділяється на 2 групи: «довгі» та «короткі». Чарункові циліндричні машини відомі, як трієри. Вони виконують процес сортування зернових компонентів за довжиною.

Графічне зображення процесу ідеального розділення в чарунковому циліндрі за довжиною наведено на рис. 3.1. Зверху розташований графік розподілу з різними середніми та стандартними відхиленнями. Це приклади можливого розподілення зернових компонентів за довжиною у вхідній суміші. У центрі розташоване коло, яке зображує чарунковий циліндр. Процес очищення залежить від декількох параметрів: зернової суміші, налаштування машини, а також перешкод, які можна виміряти та не можна (контрольовані та неконтрольовані). Вхідна суміш двокомпонентна – «довгі» та «короткі» зернові компоненти. Останні два графіки розділення показують два індивідуальні розділення «довгих» і «коротких» зернових компонентів на окремі складники. Сценарій, зображений на рис. 3.1, дуже спрощений, його можна визнати нереальним. Розділення вхідного матеріалу за довжиною в більшості випадків не може бути статистично змодельованим як ідеальна двокомпонентна суміш «довгих» та «коротких» зернових компонентів. Більш реалістичний спосіб статистичного моделювання розділення вхідного матеріалу за довжиною – використання

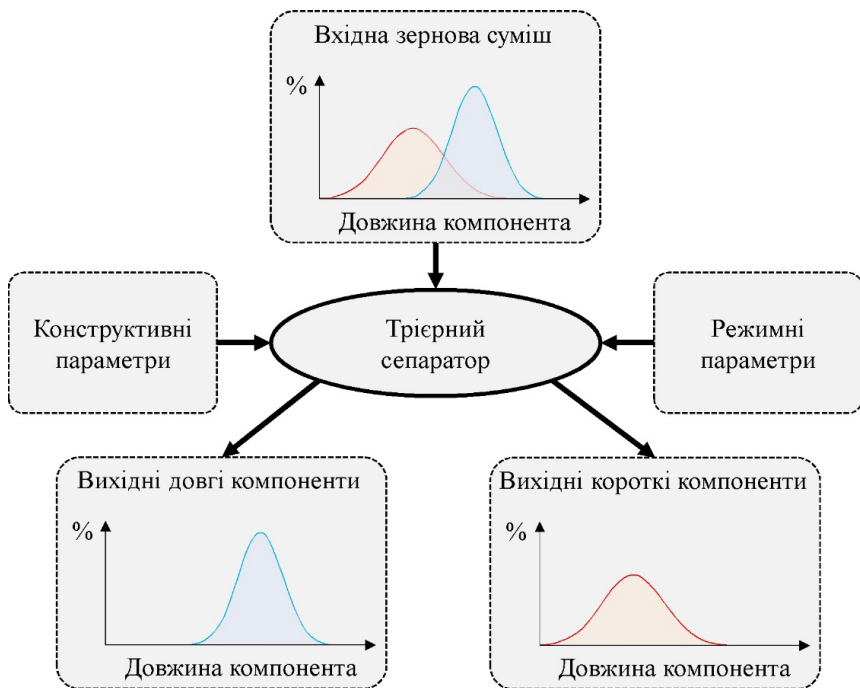


Рис. 3.1. Концептуальна модель процесу роботи чарункового трієрного сепаратора

розділення суміші нормальних випадкових величин із відповідною щільністю суміші.

Робочим органом циліндричного чарункового трієра є похилий циліндр з чарунками конкретної форми та розміру. Ці чарунки щільно розташовані на внутрішній поверхні циліндра. Такий циліндр зазвичай виготовляють зі сталюого листа, що має на поверхні поглиблення. Циліндри мають поглиблення з ідентичними геометричними розмірами або близькі до тих, що зображені на рис. 3.2. може спочатку закінчити з рис. 3.1, бо незрозуміла послідовність

Огляд принципу роботи трієрного циліндричного сепаратора представлений на рис. 3.1. Поки циліндр обертається з постійною швидкістю, зернові компоненти надходять до циліндра безперервно з піднятого кінця (наприклад, за допомогою віброживильника). Зернові компоненти падають на дно циліндра, де надалі утворюється шар.

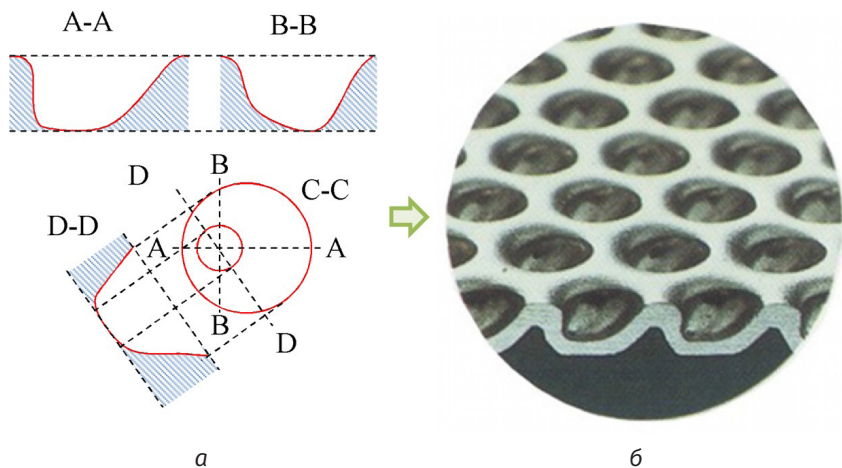


Рис. 3.2. Геометрія та фото проштампованих чарунок у формі краплі на внутрішній поверхні циліндра:

а – геометрія штампованих чарунок у формі краплі на внутрішній поверхні циліндра; б – фотографія чарунок у формі краплі

Вхідний матеріал складається з крупних компонентів, які не поміщаються в чарунки. У такому випадку на них впливає тертя з поверхнею циліндра між чарунками. Як варіант, вони можуть поміститися, але через їхню більшу довжину центр ваги зміститься. Ці два сценарії, як правило, призводять до низького рівня спокою під час обертання.

Інша дрібна фракція (пил, бите зерно) досить мала й поміщається в чарунки (де вона б перебувала в стані спокою деякий час, перед тим як випасти з чарунок). Особливо це стосується зерна з довжиною, рівною глибині чарунки або меншою за неї. Центр ваги таких зернівок, як правило, всередині чарунок, а отже, насінина надійно закріплена в чарунці під час обертання.

Наступні дві фракції суміші утворюються під час безперервного обертання циліндра. «Непіднята» фракція – фракція суміші з низькою опорою в стані спокою в чарунці при обертанні. Зерновий компонент у цій фракції переноситься за напрямками обертання циліндра та під певним кутом випадає з чарунки. Ця частина вихідних даних називається невивбраною фракцією. «Піднята» фракція – фракція суміші з високою опорою в стані спокою під час обертання. Під час обертання зерновий компонент перебуває в чарунках до певного кута вильоту, після досягнення якого зерновий компонент випадає з чарунок. Така фракція називається піднятою. Як правило, че-

рез різницю опори в стані спокою $\Theta_{\text{дов.}}$ менше, ніж $\Theta_{\text{кор.}}$. Звідси назва «піднята» і «непіднята». Це очікуване фізичне явище згадується як «явище підйому».

Чарунковий циліндр також оснащений збірним бункером, встановленим на осьовій опорі циліндра. Цей збірний бункер регулюється та має робочий кут із горизонталлю.

Частинки «піднятої» фракції з внутрішньої поверхні циліндра випадають і потрапляють до збірного бункера за умови, що його робочий кут для цього був правильно відрегульований. Ці захоплені частинки, що класифікуються як «короткі» компоненти, переносяться та виводяться із загальної маси. Частинки «непіднятої» фракції не потрапляють до збірного бункера (рис. 3.3).

Важливим моментом є відмінність між процесами розділення і сортування. Процес розділення – розподіл за довжиною, що виконується шляхом обертання чарункового циліндра. Процес сортування – результат уловлювання збірним бункером «піднятої» фракції і пропускання «непіднятої» фракції.

Внутрішня поверхня циліндра з чарунками є важливою частиною машини, і ця частина відповідає за фактичне розділення «піднятої» і «непіднятої» фракцій. Таким чином, ефективність розділення не

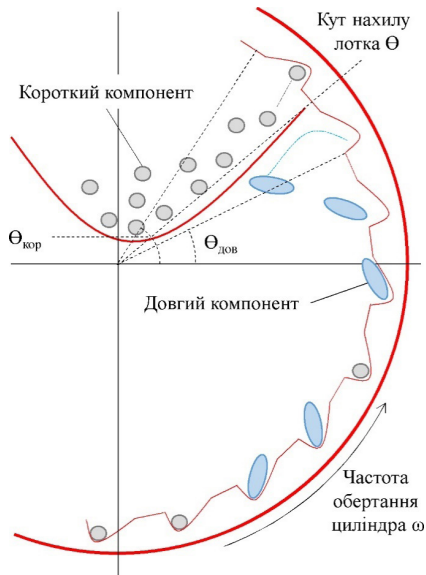


Рисунок 3.3 – Циліндр з чарунками, вид спереду

залежить від існуючого збірного бункера, який працює як форма регульованої пам'яті внутрішньої поверхні циліндра. Можливість сортування водночас залежить від збірного бункера, оскільки без нього ефективність розділення швидко «зникає».

Щоб зробити висновок про правильність розділення «довгих» та «коротких» компонентів, потрібно знати фактичні дані вихідної суміші. Іншими словами, оператор обладнання повинен знати, який результат сортування повинен бути. Наприклад, якщо вихідний матеріал складався з суміші цілого і битого зерна ячменю, оператор очікує в «короткій» фракції бите зерно, а ціле зерно – у «довгій» фракції.

Визначення формальних показників продуктивності циліндричного чарункового трієра не є тривіальним. Оптимальним результатом сортування може бути такий, що має мінімальне «перекриття» розподілу компонентів між двома вихідними підгрупами у вихідному матеріалі. Це можна розглядати як форму «критерію оптимальності» для чарункового циліндра. «Перекриття» можна визначити як кількість «коротких» компонентів, що потрапили до «довгих», плюс кількість «довгих» насінин, що потрапили до «коротких».

3.1.2. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів трієра для сепарації зернових компонентів

У результаті аналізу конструкцій відомих технічних засобів для сепарації зернової суміші за довжиною компонентів запропоновано трієр із системою автоматичного керування його режимними параметрами.

Технічна суть та принцип роботи запропонованого пристрою пояснюється кресленням: рис. 3.4 – загальний вигляд адаптивного трієра; рис. 3.5 – результат обробки отриманих світлин блоком керування.

Адаптивний трієр (див. рис. 3.4) містить раму 1, в якій встановлені підтримуючі ролики 2. У середину рами на роликах встановлено циліндричний барабан із чарунками 3. На задній частині рами 1 встановлено мотор-редуктор 4, вал якого через привідний ролик 5 дотикається до циліндричного барабана з чарунками 3. Всередині циліндричного барабана з чарунками 3 встановлено лоток 6, закріплений до рами 1 під горизонтальним кутом з можливістю обертатися навколо своїй осі. Задня частина лотка 6 кріпиться до вала крокового двигуна 7, жорстко встановленого на рамі 1. На задній частині рами 1 встановлено бункер-дозатор 8, який містить заслінку із кроковим двигуном 9. На передній частині рами 1 під циліндричним бараба-

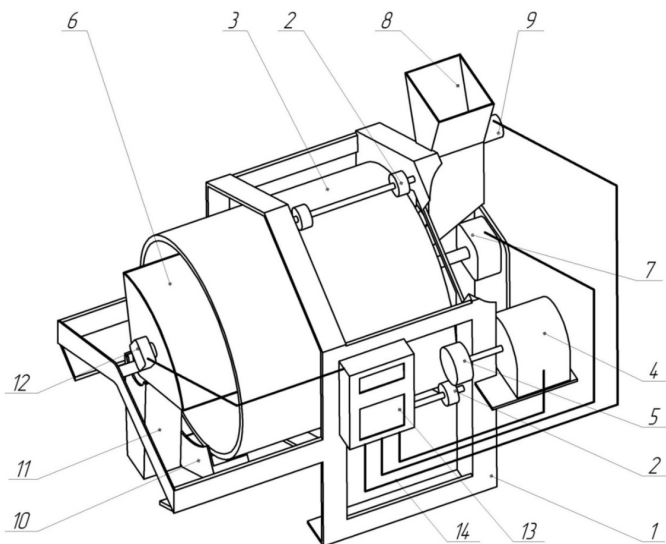


Рис. 3.4. Загальний вигляд адаптивного трієра

ном із чарунками 4 встановлено забірник більшого насіння 10, під лотком 6 – забірник меншого насіння 11. На передній частині лотка 6 встановлена фотокамера 12, об'єктив якої спрямований усередину барабана з чарунками 3. На рамі 1 закріплено блок керування 13. До блока керування 13 за допомогою електричних проводів 14 під'єднано мотор-редуктор 4, кроковий двигун 7, кроковий двигун заслінки 9 і фотокамеру 12.

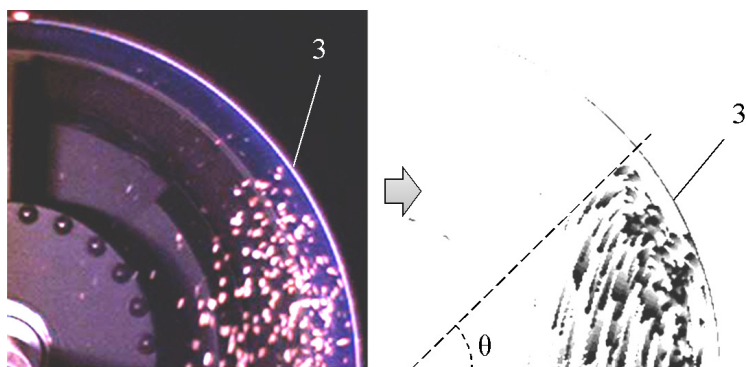


Рис. 3.5. Результат обробки отриманих світлин блоком керування

Процес сепарації на адаптивному трієрі відбувається в такий спосіб. Вихідний зерновий матеріал надходить у бункер-дозатор 8. Початкове значення подачі зернового матеріалу встановлюється на блоці керування 13. Цифровий сигнал з блока керування 13 за допомогою електричних проводів 14 надходить до крокового двигуна заслінки 9, який встановлює заслінку в певне положення.

Далі в програмному забезпеченні блока керування 13 відбувається запуск процесу сепарації і вихідний зерновий матеріал поступає в циліндричний барабан із чарунками 3. При цьому в початковий момент часу блок керування 13 передає цифровий сигнал за допомогою електричних проводів 14 до крокового двигуна 7, який встановлює лоток 6 у вертикальне положення (вісь симетрії лотка 6 паралельна вертикальній площині). Також у початковий момент часу блок керування 13 за допомогою електричних проводів 14 встановлює частоту обертання вал мотор-редуктора 4 таким чином, щоб частота обертання циліндричного барабана з чарунками 3 дорівнювала мінімальному значенню (10 об/хв).

Зміна частоти обертання циліндричного барабана з чарунками 3 відбувається так. За необхідності програмне забезпечення блока керування 13 за допомогою електричних проводів 14 змінює частоту обертання вала мотор-редуктора 4, який приводить у дію привідний ролик 5. За рахунок сил тертя, що виникають між привідним роликом 5 і циліндричним барабаном із чарунками 3, останній обертається з відповідною частотою. Циліндричний барабан із чарунками 3 виконує лише обертовий рух навколо власної осі через наявність підтримуючих роликів 2, які вільно розміщені на рамі 1.

Зміна кута нахилу лотка 6 здійснюється так. Блок керування 13 за допомогою електричних проводів 14 передає цифровий сигнал до крокового двигуна 7, вал якого обертає лоток 6 на певний кут відносно горизонтальної осі.

Регулювання величини подачі зернового матеріалу з бункера-дозатора 8 здійснюється так. Блок керування 13 за допомогою електричних проводів 14 передає цифровий сигнал до крокового двигуна заслінки 9, вал якого обертає заслінку і відкриває (або закриває) отвір, через який просипаються компоненти, тим самим збільшуючи (або зменшуючи) подачу зернового матеріалу.

Зерновий матеріал потрапляє до нижньої частини циліндричного барабана з чарунками 3, де він розміщується по чарунках і утворює відповідний шар. Вхідний матеріал умовно складається з двох фракцій: «піднята» і «не піднята». «Піднята» фракція – це компоненти

зернової суміші, які потрапляють у чарунки і залишаються в них під час обертання циліндричного барабана з чарунками 3 до висоти, на якій розміщено лоток 6. «Не піднята» фракція – це компоненти зернової суміші, які не затримуються в чарунках через їх великий геометричний розмір (довжину) і випадають з них на висоті меншій ніж розміщено лоток 6.

Далі фотокамера 12 періодично фіксує процес переміщення зерна і передає отримані світлини за допомогою електричних проводів 14 до блока керування 13. Блок керування 13 обробляє отримані світлини і визначає траєкторії руху компонентів зернової суміші і кут їх відриву θ від чарунок циліндричного барабана з чарунками 3 (див. рис. 3.5). Враховуючи максимальний кут відриву θ блок керування 13 змінює величину подачі зернового матеріалу з бункера-дозатора 8, частоту обертання циліндричного барабана з чарунками 3 і кут нахилу лотка 6. Якщо блок керування 13 не здатний визначити траєкторію руху компонентів зернової суміші і кут їх відриву θ , то подача зернового матеріалу з бункера-дозатора 8 зменшується, в іншому випадку вона збільшується для забезпечення найбільшої продуктивності процесу сепарації.

Якщо максимальний кут відриву θ перевищує 90° , то частота обертання циліндричного барабана з чарунками 3 зменшується. Якщо максимальний кут відриву θ менший ніж 20° , то частота обертання циліндричного барабана з чарунками 3 збільшується. Кут нахилу лотка 6 встановлюється відповідно до кута відриву θ .

«Піднята» фракція зернової суміші потрапляє до лотка 6 і завдяки його нахилу до горизонтальної площини переміщується до забірника меншого зерна 11. Своєю чергою «не піднята» фракція зернової суміші поступово переміщується вздовж циліндричного барабана з чарунками 3 і потрапляє до забірника більшого зерна 11.

Використання адаптивного трієра дозволяє виконувати технологічні процеси сепарації, очищення й розділення зернових сумішей за геометричними розмірами з вищою продуктивністю. Маніпуляції з режимними параметрами адаптивного трієра дозволяють підлаштовувати його до зміни складу зернової суміші, тим самим підвищуючи якість сепарації. Окрім того, через автоматичне підлаштування режимних параметрів адаптивного трієра участь оператора установки в процесі сепарації майже нівелюється, що зменшує трудові витрати.

3.1.3. Методика чисельного моделювання трієра для сепарації зернових компонентів

Завданням чисельного моделювання є визначення теоретичних закономірностей зміни технологічних параметрів процесу сепарації зернового матеріалу від конструктивно-режимних параметрів циліндричного чарункового трієра. У дослідженнях [39–43] запропоновано вирішення подібних завдань методом кінцевих елементів, який реалізовано при моделюванні в програмному пакеті STAR-CCM+. Сам процес моделювання може здійснюватися за допомогою різних підходів, і на сьогодні їх класифікація включає такі методи [44]: емпіричні; аналізу структури потоків матеріалу за допомогою функції розподілення часу перебування часток; механіки суцільних середовищ; ентропійно-інформаційні; статистичні.

Значне поширення серед дослідників отримали такі типові математичні моделі структури потоку матеріалу: моделі ідеального витиснення та ідеального змішування, дифузійна та комбінована моделі [45, 46].

Стратегія комплексного системного аналізу фізико-механічної системи передбачає на початковому етапі якісний аналіз. При цьому для процесу сепарації виділяються два рівні ієрархії фізико-механічних ефектів і явищ: сукупність фізико-механічних явищ в елементарному обсязі (мікрорівень); сукупність фізико-механічних явищ в обсязі всього апарату (макрорівень). Тому необхідно провести чисельне моделювання процесу переміщення зернового матеріалу під дією циліндра чарункового трієра, що обертається, і визначити його фізико-математичну модель [47, 48].

При моделюванні процесу методом кінцевих елементів задаються початкові положення швидкості зерна і повітряного потоку. Потім, з огляду на ці початкові дані заданих фізичних законів контактної взаємодії, обчислюються зусилля, що діють на кожен зернину в кожен інтервал часу. Для кожної зернини обчислюється результуюча сила і також вирішується задача Коші на вибраному відрізьку часу, результатом якої є початкові дані для наступного кроку. За фізичні моделі для чисельного моделювання були обрані такі: k - ε модель турбулентності розділеної течії, поле сили тяжіння, модель реального газу Ван-дер-Ваальса, модель дискретних елементів, модель багатофазної взаємодії [49–51]. Метод дискретних елементів базується на законах збереження імпульсу і моменту імпульсу для Лагранжевих моделей багатофазного середовища. Однак для побудови фізико-математичної моделі необхідно прийняти припущення про те, що

зернини мають вигляд однакових еліпсоїдів з визначеною щільністю й ефективним діаметром.

За модель зернини були прийняті насінини гірчиці, фізико-механічні властивості яких були такими: коефіцієнт Пуассона – 0,5; модуль Юнга – 0,2 МПа; щільність – 700 кг/м³; коефіцієнт тертя спокою – 0,8; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5; коефіцієнт опору кочення – 0,3 [52]. Модель насінини гірчиці є куля (рис. 3.6). При цьому ефективний діаметр насіння підпорядковується нормальному розподілу і характеризується густиною ймовірності (рис. 3.7):

$$f(d_g, \bar{d}_g, \sigma_g) = \frac{1}{\sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(d_g - \bar{d}_g)^2}{2\sigma_g^2}\right), \quad (3.1)$$

де $\bar{d}_g = 0,002$ м – середнє значення ефективного діаметра зерна, м;
 $\sigma_g = 0,001$ м – середнє квадратичне відхилення ефективного діаметра зерна, м.

При цьому зернини можуть мати ефективний діаметр, який перебуває в діапазоні $d_g \in [d_{g\min}; d_{g\max}]$, де $d_{g\min} = 0,001$ м – мінімальне значення ефективного діаметра зерна, м; $d_{g\max} = 0,003$ м – максимальне значення ефективного діаметра зерна, м.

Зернова суміш складалась з двох компонентів: зерно основної культури і домішки.

За моделі домішок у зерновій суміші були прийняті такі фізико-механічні властивості: коефіцієнт Пуассона – 0,5; модуль Юнга – 0,2 МПа; щільність – 700 кг/м³; коефіцієнт тертя спокою – 0,8; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5; коефіцієнт опору кочення – 0,3. Модель домішок наведена на рис. 3.6, б. При цьому ефективний діаметр домішок підпорядковується нормальному розподілу і характеризується густиною ймовірності (рис. 3.7):

$$f(d_i, \bar{d}_i, \sigma_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(d_i - \bar{d}_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (3.2)$$

де $\bar{d}_i = 0,003$ м – середнє значення ефективного діаметра домішки, м;
 $\sigma_i = 0,001$ м – середнє квадратичне відхилення ефективного діаметра домішки, м.



Рисунок 3.6 – Моделі зерна (а) і домішок (б)



Рис. 3.7. Розподіл кількості зерна основної культури і домішок за їх ефективним діаметром

При цьому насіння можуть мати ефективний діаметр, який перебуває в діапазоні $d_g \in [d_{gmin}; d_{gmax}]$, де $d_{gmin} = 0,002$ м – мінімальне значення ефективного діаметра домішки, м; $d_{gmax} = 0,004$ м – максимальне значення ефективного діаметра домішки, м.

Властивості середовища були такі: середовище – повітря; динамічна в'язкість – $1,85508 \cdot 10^{-5}$ Па·с; турбулентне число Прандтля – 0,9; прискорення вільного падіння – $9,8$ м/с²; температура – 293 К; тиск – 101325 Па.

Сітка моделі – це зона, в якій відбувається процес сепарації зернового матеріалу. Вона обмежена поверхнею, завдяки якій зерновий матеріал не буде її перетинати. Сітка моделі подана у вигляді багатограничних комірок різного розміру. Важливим є те, що розмір комірки впливає на якість розрахунку (чим менша чарунка, тим вища якість) і відповідно впливає на час розрахунку. У результаті попереднього моделювання встановлено, що раціональний розмір комірки сітки моделювання становить 0,0012 м (рис. 3.8).

Чисельне моделювання процесу розділення зернового матеріалу за довжиною проведено так.

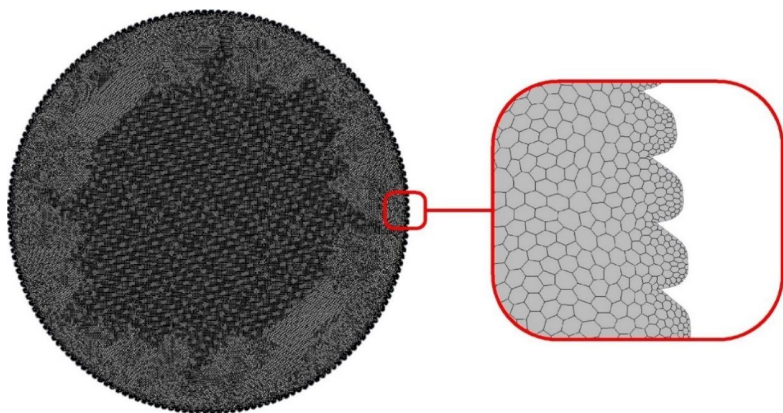


Рис. 3.8. Сітка моделі чисельного моделювання в програмному пакеті STAR-CCM+

Розрахункова схема циліндричного чарункового трієра подана на рис. 3.9, де бачимо два плоских зображення циліндра чарункового трієра із зерновим матеріалом у поперечному розрізі в системі координат xOy : з лівої сторони циліндр у стані спокою, з правої – циліндр під час обертання за годинниковою стрілкою упродовж 20 секунд. Діаметр циліндра D постійний. Важливими критеріями було визначення максимального θ_{\max} та мінімального θ_{\min} кутів повороту на моментах сходу першого компонента зернового матеріалу та останнього. Кількість зернин N_0 у проміжку між θ_{\max} та θ_{\min} є опосередкованим показником продуктивності трієра, оскільки під час обертання циліндра матеріал піднімається за траєкторією руху. Під

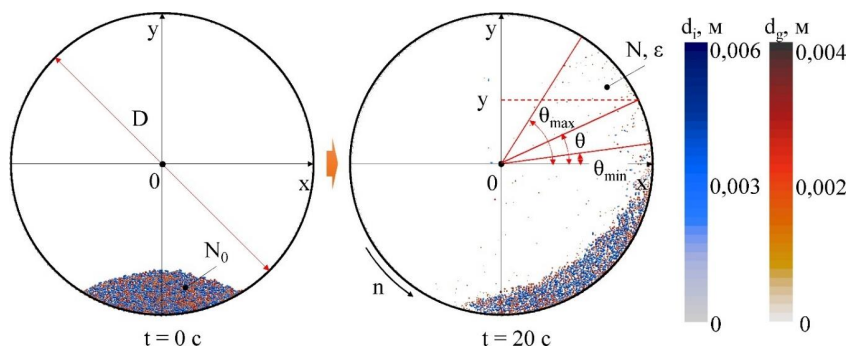


Рис. 3.9. Розрахункова схема циліндричного чарункового трієра для чисельного моделювання в програмному пакеті STAR-CCM+

час обертання циліндра трієра довгі домішки випадають з чарунок, не доходячи до області θ_{\min} та θ_{\max} , але має місце поняття випадковості, коли за випадкових умов домішка доходить до області між θ_{\min} та θ_{\max} . Якість процесу сепарації зернового матеріалу залежить від кількості домішок, що потрапили до проміжку між θ_{\min} та θ_{\max} .

Факторами для чисельного моделювання є діаметр циліндра трієрного сепаратора D , частота його обертання n і кількість зернин у зерновій суміші N_0 в початковий момент часу. Рівні варіювання факторами наведено в таблиці 3.1. Чисельне моделювання проведено за повним факторним дослідом із загальною кількістю дослідів – $5^3 = 125$.

У момент виходу зернин з чарунки фіксувалося значення кута θ полярної системи координат і координати в декартовій системі координат згідно з рис. 3.9. Приклад розподілу висоти розміщення компонентів зернової суміші залежно від їх ефективного діаметра наведено на рис. 3.10.

З переліку значень кута θ виходу зернини з чарунки визначалися мінімальне θ_{\min} і максимальне θ_{\max} значення.

За критерій продуктивності обрано кількість усіх компонентів зернової суміші N , які перебували в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора.

За критерій оцінювання якості процесу сепарації прийнято відносний вміст домішок ϵ в зерновій суміші, яка перебувала в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора.

В результаті обробки даних у програмному пакеті Mathematica необхідно встановити залежності вищезазначених критеріїв про-

Таблиця 3.1

Рівні варіювання факторами чисельного моделювання

Рівень	Фактор		
	Діаметр циліндра трієра D , м (x_1)	Частота обертання циліндра трієра n , об/хв (x_2)	Кількість зерна і домішок у зерновій суміші N_0 , шт. (x_3)
-1,0	0,2	30,0	1000
-0,5	0,3	37,5	2000
0	0,4	45,0	3000
+0,5	0,5	52,5	4000
+1,0	0,6	60,0	5000

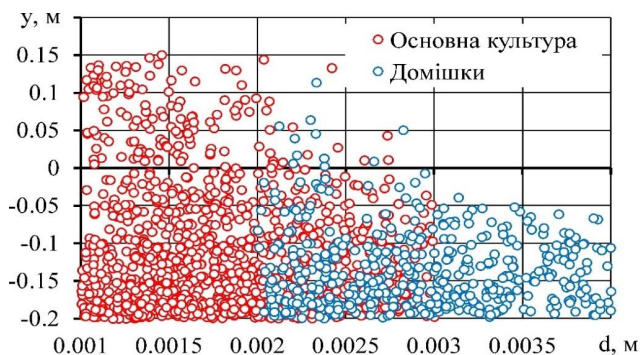


Рис. 3.10. Розподіл висоти розміщення компонентів зернової суміші залежно від їх ефективного діаметра d при $D = 0,4$ м, $n = 45$ об/хв, $N_0 = 2000$ шт.

цесу сепарації від факторів досліджень у вигляді рівнянь регресії другого порядку.

Статистична обробка отриманих даних у програмному пакеті Mathematica полягала у визначенні критерію Стьюдента для кожного коефіцієнта рівняння регресії й порівняння його з табличним значенням. Якщо розраховане значення менше за табличне, то коефіцієнт рівняння регресії є незначним і його можна не враховувати. Отримане рівняння регресії перевірялося на адекватність за допомогою критерію Фішера і коефіцієнта кореляції.

3.1.4. Результати чисельного моделювання трієра для сепарації зернових компонентів

У результаті чисельного моделювання процесу сепарації зернового матеріалу на циліндричному чарунковому трієрі отримано візуалізацію, яка наведена на рис. 3.11–3.13 [53–56].

На рис. 3.11 надано візуалізацію процесу сепарації зернового матеріалу на циліндричному чарунковому трієрі залежно від кількості зерна і домішок у зернової суміші N_0 . Показано три плоских зображення циліндрів трієра в поперечному розрізі з постійним діаметром $D = 0,4$ м, з постійною частотою обертання циліндра $n = 45$ об/хв. У першому випадку кількість зернин $N_0 = 1000$ шт., у другому $N_0 = 3000$ шт., у третьому випадку $N_0 = 5000$ шт.

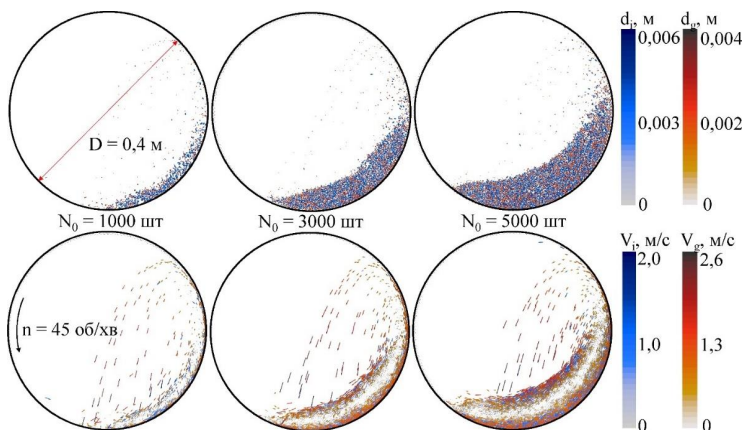


Рис. 3.11. Візуалізація процесу сепарації зернового матеріалу на циліндричному чарунковому трієрі залежно від кількості зернин і домішок у зерновій суміші N_0

Під час обертання циліндра в кожному випадку за траєкторією руху циліндра зерновий матеріал піднімається на певну висоту. При найменшій кількості зерна (при $N_0 = 1000$ шт.) видно, що більша частина (25,3%) зернового матеріалу піднімається за напрямком обертання циліндра з початкової точки до кута θ , при $N_0 = 3000$ шт. піднімається більша кількість зернового матеріалу – 32,2% від загальної кількості, при $N_0 = 5000$ шт. – ще більша (36,6%). Бачимо, що зі збільшенням кількості зернового матеріалу, утворюється так званий мертвий шар матеріалу, який позначений на рисунку білими зонами у вигляді дуги. Ця зона називається мертвою через відсутність перемішування шарів зернового матеріалу, оскільки постійна частота та діаметр циліндра не пристосовані для сепарації великої кількості зернового матеріалу. Вилучення «мертвого шару» при більшій кількості зернового матеріалу можна досягти за рахунок збільшення частоти обертання циліндра трієра або збільшення діаметра циліндра.

На рис. 3.12 надано візуалізацію процесу сепарації зернового матеріалу на циліндричному чарунковому трієрі залежно від частоти обертання циліндра трієра n . Показано три плоскі зображення циліндрів трієра в поперечному розрізі з постійним діаметром $D = 0,4$ м, постійною кількістю зернового матеріалу $N_0 = 3000$ шт. та різною частотою обертання циліндрів $n = 30$ об/хв, $n = 45$ об/хв, $n = 60$ об/хв. У випадку з найменшою частотою обертання $n = 30$ об/хв,

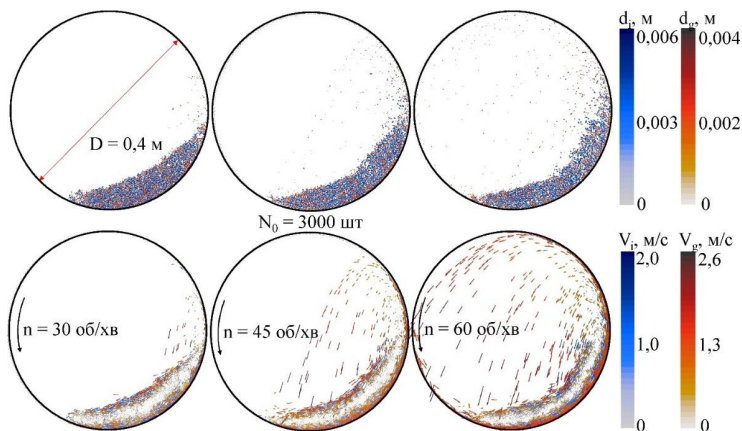


Рис. 3.12. Візуалізація процесу сепарації зернового матеріалу на циліндричному чарунковому трієрі залежно від частоти обертання циліндра трієра n

більша частина зернового матеріалу не доходить до області θ_{\min} та θ_{\max} , а отже, обрана частота не ефективна.

Також з рисунка видно «мертвий шар» зернового матеріалу, кількість якого можна зменшити за рахунок збільшення частоти обертання циліндра. За частоти обертання циліндра $n = 45$ об/хв видно, що зерновий матеріал доходить до області θ_{\min} та θ_{\max} , але в такому випадку також присутній «мертвий шар». У випадку частоти обертання циліндра $n = 60$ об/хв зерновий матеріал перелітає область θ_{\min} та θ_{\max} , але при цьому зменшується «мертвий шар». Найдоцільнішою є середня частота обертання циліндра, а саме $n = 45$ об/хв.

На рис. 3.13 надано візуалізацію процесу сепарації зернового матеріалу на циліндричному чарунковому трієрі залежно від діаметра циліндра трієра D . Показано три плоскі зображення циліндрів трієра в поперечному розрізі з постійною кількістю зернового матеріалу $N_0 = 3000$ шт., постійною частотою обертання $n = 45$ об/хв та різними діаметрами циліндра, що становлять $D = 0,2$ м, $D = 0,4$ м, $D = 0,6$ м.

За найменшого діаметра циліндра зерновий матеріал заповнює циліндр майже наполовину; при обертанні циліндра лише невелика кількість зернового матеріалу піднімається до області між θ_{\max} та θ_{\min} , в той час уся інша маса утворює «мертвий шар». Найменший діаметр циліндра використовувати в подальших до-

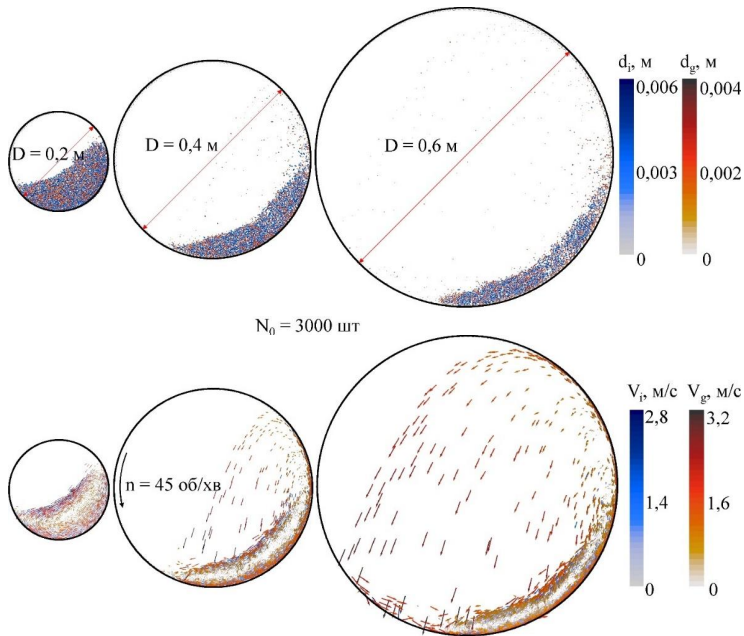


Рис. 3.13. Візуалізація процесу сепарації зернового матеріалу на циліндричному чарунковому трієрі залежно від діаметра циліндра трієра D

слідженнях недоцільно, оскільки ефективність сепарації в такому випадку буде мінімальною.

У випадку середнього діаметра під час обертання циліндра зерновий матеріал піднімається до області між θ_{\min} та θ_{\max} . У випадку з найбільшим діаметром $D = 0,6$ м під час обертання циліндра більша частина зернового матеріалу перелітає область між θ_{\min} та θ_{\max} , але саме в цьому випадку спостерігається найменший «мертвий шар» на відміну від перших двох випадків. З рисунка видно, що найдоцільніше в подальших дослідженнях використовувувати циліндр з діаметром $D = 0,4$ м.

Обробка отриманих даних у програмному пакеті Mathematica дозволила отримати рівняння регресії другого порядку, яке показує залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу зерна з чарунки циліндра трієра від факторів досліджень у розкодованому вигляді:

$$\theta_{\min} = -0,0858955 + 0,12522 D - 0,630707 D^2 + 0,00831824 n - 0,000124883 N_0 + 2,71427 \cdot 10^{-6} n N_0 + 9,1622 \cdot 10^{-9} N_0^2, \quad (3.3)$$

$$\theta_{\max} = -0,786462 + 1,43559 D - 1,84779 D^2 + 0,020566 n + 0,0317732 Dn. \quad (3.4)$$

Графічна інтерпретація залежностей (3.3), (3.4) наведена на рис. 3.14–3.16.

На рис. 3.14 показана залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів виходу зерна з чарунки циліндра трієра від діаметра циліндра трієра D та частоти обертання циліндра трієра n . Помаранчевою площиною виділена залежність значення максимального кута виходу зернини з чарунки θ_{\max} від значень частоти обертання циліндра трієра та діаметра циліндра, зеленою площиною позначено залежність значень мінімального кута виходу зернини від значень частоти обертання циліндра трієра та діаметра циліндра.

З рисунка видно, що зі збільшенням частоти обертання циліндра та збільшенням його діаметра зростають значення кутів виходу зерна з чарунки циліндра трієра. Максимальний кут виходу зернини спостерігається за максимальної частоти обертання циліндра, а саме $n = 60$ об/хв та максимального діаметра $D = 0,6$ м, і становить $\theta_{\max} = 1,5$ рад. Найменше значення максимального кута виходу зерна спостерігається за мінімальної частоти обертання циліндра, а саме $n = 30$ об/хв, та найменшого діаметра $D = 0,2$ м і становить $\theta_{\max} = 0,3$ – $0,4$ рад.

Мінімальний кут виходу зерна з чарунки циліндра трієра θ_{\min} також залежить від діаметра циліндра D та його частоти обертання n . З рисунка видно, що зі збільшенням частоти обертання циліндра збільшується мінімальний кут вильоту зерна θ_{\min} , який становить $0,4$ рад за частоти обертання циліндра $n = 60$ об/хв. За мінімальної частоти обертання циліндра, а саме $n = 30$ об/хв, мінімальний кут виходу зерна становить $\theta_{\min} = 0$ рад. Це пов'язано з тим, що за мінімальної частоти обертання циліндра зерновий матеріал майже не переміщується в циліндрі і не доходить до області θ_{\min} .

На рис. 3.14 показана залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів виходу зерна з чарунки циліндра трієра від діаметра циліндра трієра D та кількості всіх компонентів зернової суміші N . Помаранчевою площиною виділена залежність значень максимального кута виходу зерна з чарунки θ_{\max} від кількості всіх компонентів зернової суміші N та діаметра циліндра трієра, зеленою площиною позначено залежність значень мінімального кута виходу зерна θ_{\min} від кількості всіх компонентів зернової суміші N та діаметра циліндра трієра D .

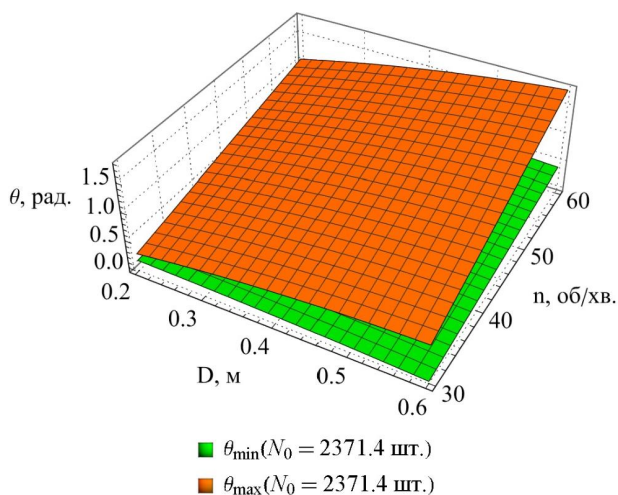


Рис. 3.14. Залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу зернини з чарунки циліндра трієра від діаметра циліндра трієра D та частоти обертання циліндра трієра n

З рисунка видно, що зі зменшенням діаметра циліндра D та збільшенням кількості зерна в суміші N збільшується значення мінімального кута виходу зерна θ_{\min} . Це пояснюється тим, що за мінімального значення діаметра циліндра D , а саме $D = 0,2$ м, зерновий матеріал майже не переміщується або переміщується, утворюючи товстий шар зернового матеріалу, серед якого утворюється «мертвий шар». Максимальний кут виходу зерна з чарунки θ_{\max} , навпаки, зростає зі збільшенням діаметра циліндра D . Це пояснюється тим, що зерновий матеріал краще розподіляється на внутрішній поверхні циліндра й утворює тонкий шар, який легше переміщується при обертанні циліндра трієра. Кількість зернового матеріалу не впливає на максимальний кут виходу зерна з чарунки θ_{\max} при різних значеннях діаметра циліндра D .

На рис. 3.15 показана залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів виходу зерна з чарунки циліндра трієра від частоти обертання циліндра трієра n та кількості зерна і домішок у зерновій суміші N_0 . Помаранчевою площиною виділена залежність значень максимального кута виходу зерна з чарунки θ_{\max} від частоти обертання циліндра трієра n та кількості зерна і домішок в зерновій суміші N_0 , зеленою площиною позначена залежність значень мінімального кута виходу зерна θ_{\min} від частоти обертання циліндра трієра n та кількості зерна і домішок в зерновій суміші N_0 .

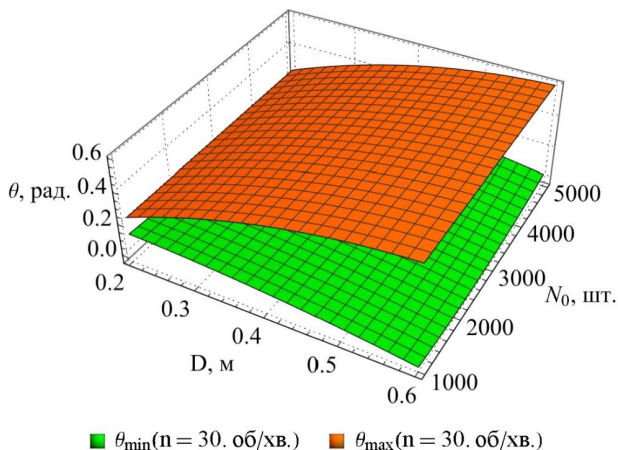


Рис. 3.15. Залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу зерна з чарунки циліндра трієра від діаметра циліндра трієра D та кількості зерна і домішок у зерновій суміші N_0

З рисунка видно, що значення мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів виходу зерна зростають зі збільшенням частоти обертання циліндра трієра n . Значення мінімального θ_{\min} кута виходу зерна зростають зі збільшенням частоти обертання циліндра трієра n , а також ці значення залежать від кількості зерна і домішок у зерновій суміші N_0 . З рисунка видно, що зі збільшенням кількості зернового матеріалу зростає мінімальний θ_{\min} кут виходу зерна з чарунки. Це пояснюється тим, що за більшої частоти обертання циліндра трієра n більше зернового матеріалу розподіляється по внутрішній поверхні циліндра трієра за напрямом обертання циліндра і зменшується утворення «мертвого шару» зернового матеріалу.

Максимальний кут виходу зерна з чарунки θ_{\max} також зростає зі збільшенням частоти обертання циліндра трієра n . Кількість зернового матеріалу не впливає на максимальний кут виходу зерна з чарунки θ_{\max} .

Статистичний аналіз рівнянь (3.3) і (3.4) у досліджуваному діапазоні варіювання показав, що коефіцієнт кореляції Пірсона становить 0,82 і 0,85 відповідно. Своєю чергою критерій Фішера становить $F_{(2,23)} = 2,27 < F_T = 2,49$ і $F_{(2,24)} = 2,17 < F_T = 2,49$ відповідно. Це підтверджує адекватність отриманих моделей.

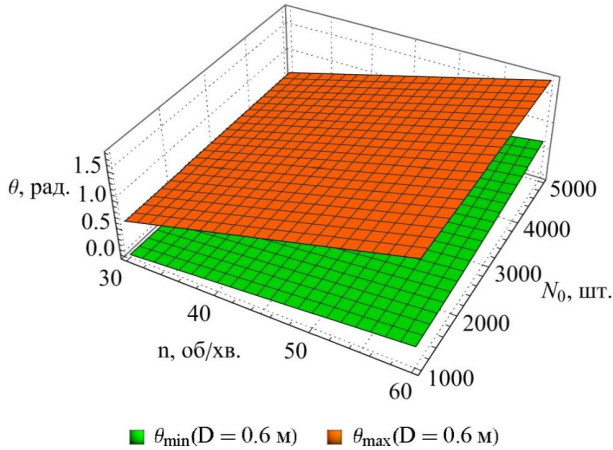


Рис. 3.16. Залежність мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу зерна з чарунки циліндра трієра від частоти обертання циліндра трієра n та кількості зерна і домішок в зерновій суміші N_0

Обробка отриманих даних у програмному пакеті Mathematica дозволила отримати рівняння регресії другого порядку, яке показує залежність значень кількості всіх компонентів зернової суміші N , які перебували в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндра трієрного сепаратора, від факторів досліджень у розкодованому вигляді:

$$N = 534,531 - 1414,9 D + 1193,5 D^2 - 17,88 n + 19,7533 D n + 0,132741 n^2 + 0,03816 N_0 - 0,2215 D N_0 + 0,00302044 n N_0. \quad (3.5)$$

Оптимальні значення факторів при умові максимуму кількості всіх компонентів зернової суміші ($N = 816$ шт.) становлять $D = 0,2 \text{ м}$, $n = 60 \text{ об/хв}$, $N_0 = 5000 \text{ шт}$.

Графічна інтерпретація залежності (3.5) наведена на рис. 3.17–3.19.

На рис. 3.17 показано залежність значень кількості всіх компонентів зернової суміші N , які перебували в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора, від діаметра циліндра трієра D та частоти обертання циліндра трієра n . З рисунка видно, що значення кількості всіх компонентів зернової суміші N зростають зі зменшенням діаметра циліндра та збільшенням частоти обертання циліндра n . Зі збільшенням частоти обертання циліндра до чарунок частіше буде потрапляти зерновий матеріал

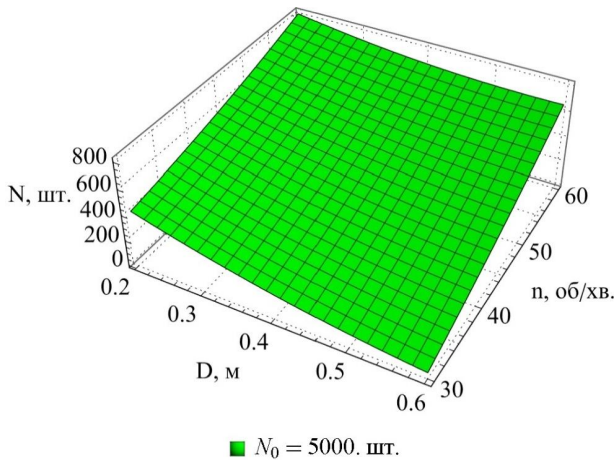


Рис. 3.17. Залежність значень кількості всіх компонентів зернової суміші N , які перебували в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора, від діаметра циліндра трієра D та частоти обертання циліндра трієра n

і відповідно зерновий матеріал ефективніше буде розділятися на основну культуру і домішки. Діаметр циліндра трієра D також має значення, оскільки за більшого діаметра менша кількість зернового матеріалу доходить до області між мінімальним θ_{\min} і максимальним θ_{\max} кутами повороту циліндру трієрного сепаратора.

З рисунка видно, що кількість всіх компонентів зернової суміші N , які перебували в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора, зростає зі збільшенням загальної кількості всіх компонентів зернової маси N_0 . Також з рисунка видно, що кількість всіх компонентів зернової суміші N , які перебували в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора, зростає зі збільшенням діаметра циліндра D .

На рис. 3.18 показано залежність значень кількості всіх компонентів зернової суміші N , які перебували в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від частоти обертання циліндра трієра n та кількості зернин і домішок в зерновій суміші N_0 . З рисунка видно, що частота обертання циліндра n за мінімального значення N_0 ($N_0 = 1000$ шт.) майже не впливає на значення кількості всіх компонентів зернової суміші N , які перебували в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту

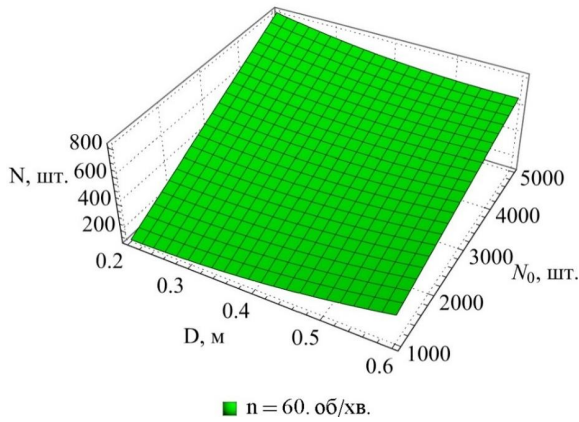


Рис. 3.18. Залежність значень кількості всіх компонентів зернової суміші N , які перебували в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора, від діаметра циліндра трієра D та кількості зерна і домішок у зерновій суміші N_0

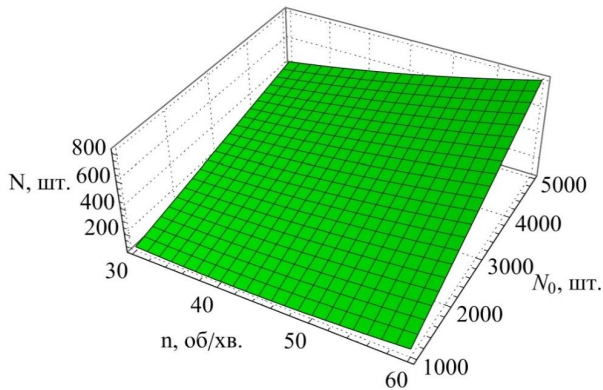
циліндру трієрного сепаратора. Зі збільшенням значень N_0 та частоти обертання циліндра n зростають значення кількості зернового матеріалу N . Кількість зерна та домішок у зерновому матеріалі N_0 впливає на кількість зернового матеріалу N , який перебував у межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} : що більша кількість N_0 , то більша кількість матеріалу доходила до необхідних меж.

Статистичний аналіз рівняння (3.5) у досліджуваному діапазоні варіювання показав, що коефіцієнт кореляції Пірсона становить 0,83. Своєю чергою критерій Фішера становить $F_{(2,27)} = 1,11 < F_T = 1,87$. Це підтверджує адекватність отриманих моделей.

Обробка отриманих даних у програмному пакеті Mathematica дозволила отримати рівняння регресії другого порядку, яке показує залежність відносного вмісту домішок ε в зерновій суміші, яка перебувала в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від факторів досліджень в розкодованому вигляді:

$$\varepsilon = 44,321 - 161,241 D + 131,278 D^2 + 0,376244 n - 0,000644556 N_0 - 0,00009763 n N_0 + 1,03014 \cdot 10^{-6} N_0^2. \quad (3.6)$$

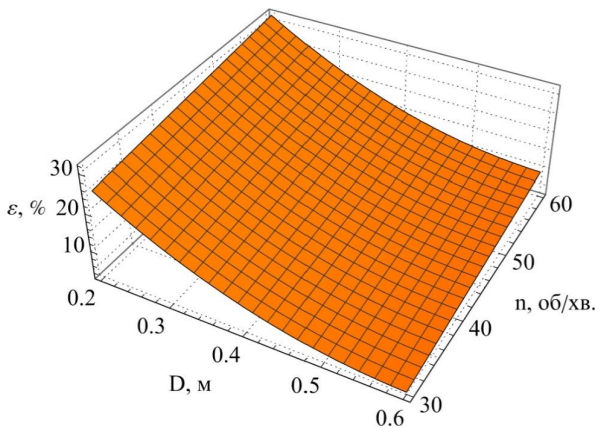
Оптимальні значення факторів при умові мінімуму відносного вмісту домішок у зерновій суміші ($\varepsilon = 3,02\%$) становлять $D = 0,6$ м, $n = 30$ об/хв, $N_0 = 1734$ шт.



■ $D = 0.2 \text{ м}$

Рис. 3.19. Залежність значень кількості всіх компонентів зернової суміші N , які перебували в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора, від частоти обертання циліндру трієра n та кількості зерна і домішок у зерновій суміші N_0

Графічна інтерпретація залежності (3.6) наведена на рис. 3.20–3.22. На рис. 3.20 показано залежність відносного вмісту домішок ε в зерновій суміші, яка перебувала в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора, від



■ $N_0 = 1734.46 \text{ шт.}$

Рис. 3.20. Залежність відносного вмісту домішок ε в зерновій суміші, яка перебувала в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора, від діаметра циліндру трієра D та частоти обертання циліндру трієра n

діаметра циліндра трієра D та частоти обертання циліндра трієра n . З рисунка видно, що зі зменшенням діаметра циліндра D збільшується відносний вміст домішок ϵ в зерновій суміші. Це пояснюється тим, що за меншого діаметра ефективність розділення зернового матеріалу значно знижується. Частота обертання циліндра n також впливає на відносний вміст домішок у зерновому матеріалі. При збільшенні значень частоти n збільшується відносний вміст домішок ϵ .

На рис. 3.21 показано залежність значень відносного вмісту домішок ϵ в зерновій суміші, яка перебувала в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндра трієрного сепаратора, від діаметра циліндра трієра D та кількості зерна і домішок в зерновій суміші N_0 . З рисунка видно, що відносний вміст домішок ϵ в зерновій суміші зростає зі зменшенням діаметра циліндра та збільшенням кількості зерна і домішок у зерновій суміші N_0 . Максимальну кількість зернового матеріалу ($N_0 = 4000$ шт., $N_0 = 5000$ шт.) раціональніше розділяти за допомогою циліндра з більшим діаметром, а саме $D = 0,5-0,6$ м.

На рис. 3.21 показано залежність значень відносного вмісту домішок ϵ в зерновій суміші, яка перебувала в межах мінімального θ_{\min}

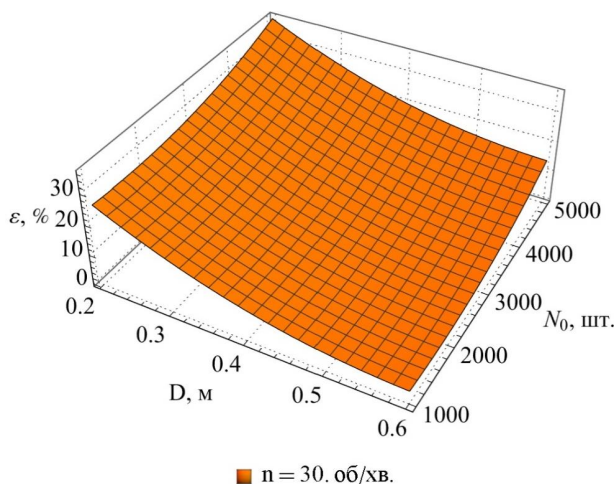


Рис. 3.21. Залежність значень відносного вмісту домішок ϵ в зерновій суміші, яка перебувала в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндра трієрного сепаратора від діаметра циліндра трієра D та кількості зерна і домішок у зерновій суміші N_0

і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від частоти обертання циліндра трієра n та кількості зернин і домішок у зерновій суміші N_0 . З рисунка видно, що найбільші значення відносного вмісту домішок ϵ відбуваються у двох випадках: при мінімальному значенні частоти обертання циліндра $n = 30$ об/хв та максимальній кількості зернової суміші $N_0 = 5000$ шт. відносний вміст домішок ϵ в зерновій суміші становить $\epsilon = 13\%$; при максимальному значенні частоти обертання циліндра $n = 60$ об/хв та мінімальній кількості зернової суміші $N_0 = 1000$ шт. відносний вміст домішок ϵ в зерновій суміші становить $\epsilon = 12-14\%$.

Статистичний аналіз рівнянь (3.6) в досліджуваному діапазоні варіювання показав, що коефіцієнт кореляції Пірсона становить 0,88. Своєю чергою критерій Фішера становить $F_{(2,28)} = 1,81 < F_T = 2,49$. Це підтверджує адекватність отриманих моделей.

У зв'язку з тим що для кожного критерію оцінки досліду визначені оптимальні значення факторів, які не збігаються, вирішимо компромісну задачу, яка має вигляд:

$$\begin{cases} \epsilon(D, n, N_0) \rightarrow \min, \\ N(D, n, N_0) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (3.7)$$

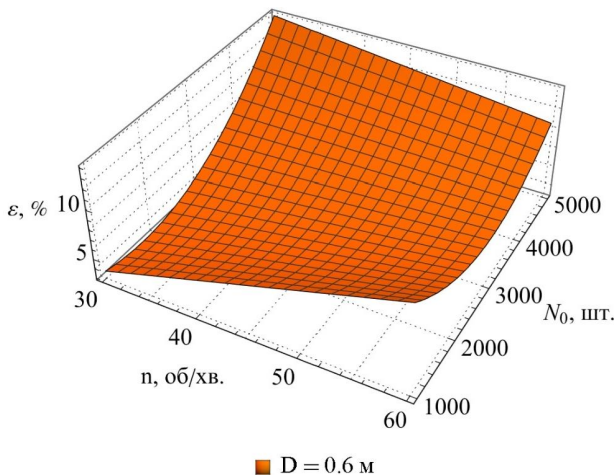


Рисунок 3.22 – Залежність значень відносного вмісту домішок ϵ в зерновій суміші, яка перебувала в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора, від частоти обертання циліндра трієра n та кількості зерна і домішок у зерновій суміші N_0

Задачу (3.7) будемо вирішувати методом скалярного ранжування шляхом мінімізації мультиплікативної функції з урахування коефіцієнта важливості приватного критерію:

$$\frac{N}{\max(N)} / \frac{\varepsilon}{\max(\varepsilon)} \rightarrow \max \quad (3.8)$$

де \max – максимальне значення функції.

Вирішуючи в програмному пакеті Mathematica рівняння (3.8) спільно з (3.5) і (3.6) отримуємо раціональні конструктивно-технологічні параметри трієрного сепаратора: $D = 0,58$ м, $n = 46,8$ об/хв, $N_0 = 2722$ шт. При цих параметрах критерії оптимізації дорівнювали $N = 251$ шт., $\varepsilon = 5,89\%$, $\theta_{\min} = 0,22$ рад., $\theta_{\max} = 1,26$ рад.

3.1.5. Лабораторний зразок удосконаленого трієра для сепарації зернових компонентів

Конструктивно-технологічна схема і загальний вигляд удосконаленого лабораторного циліндричного чарункового трієра наведено на рис. 3.23. Від серійного зразка лабораторного циліндричного чарункового трієра удосконалений відрізняється тим, що додатково забезпечений кроковим двигуном, вал якого закріплений до лотка, заслінкою з кроковим двигуном, встановленою в бункері-дозаторі, фотокамерою, об'єктив якої спрямований у середину барабана з чарунками, і встановленою на передній частині лотка, блоком керування, який за допомогою електричних проводів підключений до мотор-редуктора, крокового двигуна, крокового двигуна заслінки і фотокамери.

Окрім того, блок керування кроковим двигуном, блок керування електродвигуном і відеокамера підключаються до персонального комп'ютера для реалізації мехатронної системи керування лабораторного циліндричного чарункового трієра.

На персональному комп'ютері розроблена програма, яка дозволяє обробляти відеозображення та визначати траєкторію польоту насінин. На основі отриманих даних відбувається налаштування положення лотка для збору насіння в результаті керування кроковим двигуном. Окрім того, з персонального комп'ютера є можливість керувати електродвигуном через блок керування, а саме встановлювати частоту і напрямок обертання циліндру.

Робочим органом циліндричного чарункового трієра є циліндр, який складається з пластин із чарунками. Пластини надруковані на 3D-принтері Anycubic S із ABS+ пластика. Пластини з чарунками

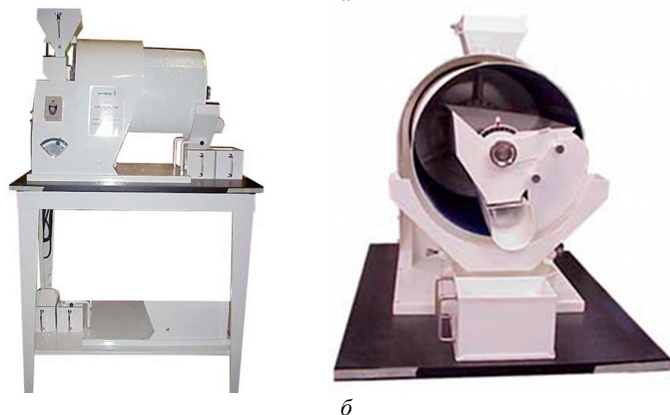
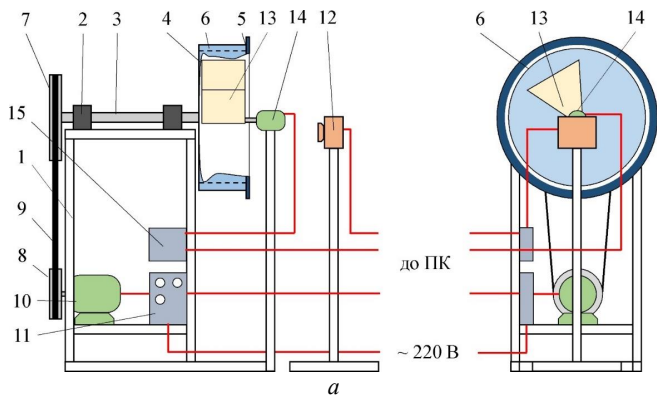


Рисунок 3.23 – Конструктивно-технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) удосконаленого лабораторного циліндричного чарункового трієра:

- 1 – станина; 2 – підшипники; 3 – вал; 4 – циліндр; 5 – скляна кришка;
- 6 – пластини із чарунками; 7 – шків відомий; 8 – шків ведучий; 9 – ремінь;
- 10 – електродвигун; 11 – блок керування електродвигуном;
- 12 – відеокамера; 13 – лоток для збору насіння; 14 – кроковий двигун;
- 15 – блок керування кроковим двигуном

закріплюються між собою і циліндром з використанням з'єднувальних замків, що унеможлиблює випадкове зміщення пластин під час обертання циліндра.

У конструкції лабораторного циліндричного чарункового трієра передбачена можливість зміни конструктивних і режимних параметрів робочого процесу: замінювати пластини з чарунками; частота обертання циліндра – від 1 до 100 об/хв; напрямок обертання циліндра.

3.2. Установка для виготовлення кормових пелет

Автори: Алієв Е. Б., Алієва О. Ю.

3.2.1. Аналіз технічних засобів для отримання кормових пелет

Пелети (пілети, пеллетс, гранули) являють собою циліндричної форми пресовані продукти із сільськогосподарської сировини та продуктів її переробки, відходів маслопереробного та інших виробництв. За кордоном кормові пелети широко використовуються для відгодівельних автоматизованих ліній як корм для тварин домашнього і промислового рівнів за рахунок того, що мають збалансований склад, значну екологічну складову частину і підвищену енергетичну цінність. Особливо популярні пелети в Польщі, Данії, Австрії та Швеції. Ці країни є також лідерами в галузі виробництва обладнання з використання кормових пелет.

Гранулювання – це процес перетворення порошкоподібного матеріалу в частинки (зерна-гранули) певної величини – укрупнення з утворенням форми й поверхні.

Гранулювання дає можливість поліпшити технологічні властивості гранульованого матеріалу: запобігає його спіканню (злипання); збільшує сипкість, що важливо для забезпечення можливості використання матеріалу дрібними порціями; полегшує вантаження, транспортування, зберігання та ін.

Основне призначення гранулювання:

- поліпшення сипучості матеріалу;
- запобігання розшаруванню сумішей сипучих матеріалів;
- запобігання злипанню частинок різної величини й питомої щільності.

Розрізняють такі види грануляції:

- 1) суха грануляція – розмел до певної величини з попереднім ущільненням (брикетуванням) або без нього;
- 2) волога грануляція – продавлювання вологих мас у зваженому шарі з наступним розпилювальним або контактним висушуванням;
- 3) структурна грануляція (грануляція у псевдозрідженому шарі).
Машини, призначені для грануляції (прес-гранулятори), пра-

цюють за принципом видавлювання: сипучі корми, корми, оброблені парою або змішані з водою, мелясою, потрапляючи на матрицю, видавлюються через її отвори пресувальними механізмами. Формування довжини гранули відбувається за допомогою відрізного механізму.

Гранульовані комбікорми мають, як правило, форму невеликих циліндрів діаметром від 2,4 до 20 мм, довжина їх, зазвичай, не перевищує 15–20 мм. Розміри гранул залежать від їх застосування [57]. Дрібні гранули від 2,5–3 мм призначені переважно для молодняку птахів (курчат, каченят і т.д.); гранули розміром близько 5 мм використовують для дорослої птиці, риби; 8 мм – поросяткам-від'ємишам; дорослим свиням – 10 мм; великій рогатій худобі – 10–14 мм. При гранулюванні зернової сировини можна додавати вітаміни та профілактичні препарати для профілактики різних захворювань і кращого зростання тварин і птахів.

Гранульовані комбікорми мають такі переваги перед розсипними: в кожній гранулі склад комбікорму однаковий, при годуванні тварини отримують максимум поживних речовин; відсутні втрати комбікорму при годуванні гранулами; гранульовані комбікорми легко піддаються транспортуванню та зберіганню, менше піддаються впливу зовнішнього середовища, займають менший об'єм; при переміщенні гранул немає самосортування, зменшується розпил продукту. Гранульовані корми краще ніж розсипні зберігають поживні речовини і вітаміни, швидко з'їдаються і добре засвоюються тваринами.

Кожна гранула являє собою повноцінний набір усіх поживних речовин, укладених у комбікормі, тоді як при годуванні розсипним комбікормом птахи їдять тільки те, що їм подобається, залишаючи частину комбікорму. Гранульовані комбікорми також важливі для жуйних тварин і свиней. Зручні гранули і для риб, оскільки мають високу водостійкість, таким чином ціла гранула довго може перебувати у воді, зберігаючи поживні речовини.

Машини для гранулювання кормів класифікують за основним вузлом преса або гранулятора – пресувальний робочий орган, призначений для безпосереднього стиснення кормів з метою отримання гранул або брикетів. Робочі органи для гранулювання кормів можна розділити на чотири групи: штемпельні (плунжерні), вальцьові, матричні (роликові) і шнекові.

Штемпельні преси здійснюють процес грануляції шляхом зворотно-поступального руху штемпеля (плунжера) в пресувальному каналі відкритого або закритого типу.

У відкритому каналі робочий процес відбувається так. Сипуча кормова суміш подається до пресувального каналу, де стискається штемпелем. Досягаючи зусилля, що перевищує силу тертя спресованого матеріалу об стінки каналу, матеріал виштовхується з наступним поділом на окремі елементи. Протитиск тут створюється в результаті тертя спресованого матеріалу об стінки каналу.

Канал умовно можна розділити на дві частини: першу, де корм ущільнюється, і другу, де містяться порції корму, спресовані раніше. Перша частина каналу називається каналом ущільнення, друга – каналом опору. Регулюючи поперечний переріз останнього на виході, можна змінювати опір пересуванню спресованого матеріалу і тим самим щільність брикетування.

В закритому пресувальному каналі процес відбувається так. Матеріал, поданий до каналу ущільнення, стискається між штемпелем й упором. Після досягнення штемпелем крайнього положення формується пелета, яка виштовхується з каналу наступним ходом штемпеля при відведеному упорі. Робота виштовхування при цьому значно менша, ніж при пресуванні у відкритому каналі, що є значною перевагою. Однак, незважаючи на меншу енергоємність, закриті канали в промислових конструкціях пресів застосування не знайшли. Пояснюється це тим, що для отримання корму рівної щільності необхідна строго однакова подача матеріалу на кожен хід штемпеля, здійснення якої є завданням надзвичайно складним. Крім того, витримка під тиском в такому каналі мала, що погіршує і якість пелет.

У промислових конструкціях таких пресів реалізовані штемпельні робочі органи з відкритим пресувальним каналом. Такі робочі органи забезпечують мінімальне дроблення матеріалу, що пресується, витримку під тиском більш тривалий час, а отже, отримання пелет кращої якості з різних кормів. Енергоємність процесу пресування у них порівняно невелика. Основний недолік штемпельних пресів – обмежена продуктивність, що залежить від кількості ходів штемпеля, кількість пресувальних каналів і площі їх поперечного перерізу.

Вальцьові гранулятори кормів мають робочі органи у вигляді вальців, що працюють за принципом вальцювання. Вони являють собою пару обертових один назустріч іншому циліндрів, які захоплюють пресований матеріал і ущільнюють його між собою в нескінченну стрічку. Якщо поверхня вальців гладка, то є необхідним додатковий пристрій для поділу стрічки на окремі частини. Однак цю операцію можна здійснювати і під час процесу, для чого один або обидва вальці обладнують гострими зубами. Захоплююча здатність вальців

при цьому підвищується. В таких машинах енергоємність менша за енергоємності інших, проте спроба їх практичного застосування успіху не мала через низку причин. Для отримання значного ущільнення корму, яке має місце при гранулюванні, необхідні вальці дуже великих діаметрів, що призводить до високої матеріаломісткості конструкції. Багатоступінчасте ущільнення декількома парами вальців дозволяє застосовувати вальці малих діаметрів, але при цьому ускладнюється конструкція. Для отримання однакової щільності подача матеріалу на один оберт вальця повинна бути постійною, що є складним завданням.

Крім того, вальцьовий робочий орган може забезпечити необхідну для отримання якісних гранул витримку спресованого матеріалу під тиском тільки при дуже низьких швидкостях обертання вальців, що призводить до зниження продуктивності преса.

Найбільше застосування і поширення у виробництві гранульованого комбікорму отримали прес-гранулятори матричного типу (рис. 3.24) [58]. Вони нескладні в ремонті й обслуговуванні, мають малу вагу і габаритні розміри, що часто дозволяє робити їх пересувними і застосовувати як при веденні домашнього або фермерського господарств, так і в малотоннажному виробництві. Розглянемо їх далі.

Матричні преси складаються з матриці з пресувальними каналами і пресувальних вальців (рис. 3.25, а). Вони бувають як з кільцевою (рис. 3.25, б), так і з плоскою матрицею (рис. 3.25, в) [59]. Кільцеві матриці можна встановлювати горизонтально й вертикально, плоскі матриці – тільки горизонтально. Кільцеві матриці можуть обертатися або бути нерухомими. У пресах з матрицею, яка обертається, пресувальні вальці встановлюють на нерухомих осях. Оберткові матриці застосовують для гранулювання кормів. Перетин пресувальних каналів круглий, з діаметром від 2,5 до 25 мм.



Рис. 3.24. Прес-гранулятори кормів: а – матричного типу; б – шнекового типу

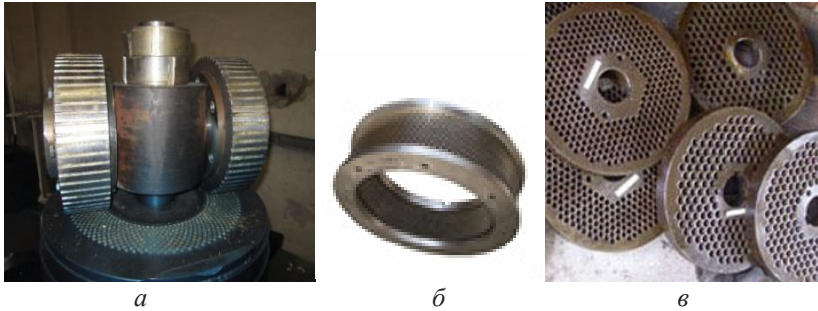


Рис. 3.25. Робочі органи матричного гранулятора:

а – пресувальні ролики; б – кільцева матриця; в – плоска матриця

При гранулюванні кормів на пресах з нерухомою матрицею зменшується руйнування пелет, оскільки відсутні відцентрові сили, під дією яких на пресах з матрицею, яка обертається, пелети кришаться від ударів об кожух преса. На пресах з нерухомою матрицею пресувальні елементи встановлені на обертовому валу.

Перевагою пресів з вертикальними кільцевими матрицями є можливість швидкої і легкої зміни матриці і вальців. Кільцеві матриці можуть мати різні пресувальні елементи, що відрізняються захоплюючою здатністю пресувальної пари. Матричні преси поділяється на преси з легкими пресувальними елементами і з обертовими пресувальними елементами, які стали найпоширенішими.

Преси з обертовими пресувальними елементами поділяються на преси з вальцями, які вільно обертаються, будучи встановленими на нерухомих осях, і преси з примусово обертовими вальцями. Пресувальні вальці, які вільно обертаються, можуть бути гладкими і з рифленою бічною поверхнею.

Обертаються вальці за рахунок сил тертя матеріалу об внутрішню поверхню матриці й бічну поверхню вальців. Захоплення й запресовування корму роликками з гладкою робочою поверхнею здійснюється недостатньо ефективно, тому що частина шару не захоплюється роликком, а штовхається ним.

Певний інтерес становлять конструкції пресів, в яких для підвищення захоплюючої здатності вальці виконані з рифленою, хвилястою або насиченою бічною поверхнею. Такі поверхні сприяють зменшенню прослизання матеріалу і, як наслідок, підвищенню продуктивності преса за рахунок збільшення коефіцієнтів тертя. Пресувальні вальці таких грануляторів можуть бути циліндричними

або конічними. Окружні швидкості конічних вальців в центрі і на периферії однакові, але через різницю діаметрів вальця захоплююча здатність його по довжині неоднакова, що призводить до втрати продуктивності преса, зважаючи на нерівномірну подачу матеріалу по площі матриці і до нерівномірного її зносу.

В одних конструкцій пресів з плоскою матрицею в обертання приводиться водило з вальцями, а матриця нерухома, в інших – обертається матриця, а осі вальців нерухомі. Процес ущільнення в такому робочому органі відбувається так. Поданий до робочої зони матеріал, утворений внутрішньою поверхнею матриці та зовнішньою поверхнею вальця, на початку стискається, а потім вдавлюється у прохідні канали матриці. У міру їх заповнення опір просуванню матеріалу збільшується, у зв'язку з чим тиск пресування зростає і досягає максимального значення при повністю заповнених каналах.

Як тільки тиск пресування стає рівним силі тертя спресованого матеріалу об стінки каналів, він виштовхується у вигляді гранул.

Шнекові преси здійснюють гранулювання циліндричним або конічним шнеком у відкритій пресувальній камері. Шнеки можуть бути з постійним або змінним кроком (рис. 3.26, а). Незважаючи на простоту конструкції, ці робочі органи отримали малу промислову реалізацію через енергоємності процесу і невисоку продуктивність. В таких пресах частина енергії витрачається на подолання тертя матеріалу об поверхню шнека і стінки корпусу, що викликає знос їх і нагрів корму.

Процес пресування в цих машинах проходить так: шнек захоплює і подає подрібнену сировину, при цьому створюючи тиск 25–35 атм. До матриці (рис. 3.26, б). Внаслідок цього матеріал розігрівається



а



б

Рис. 3.26. Робочі органи шнекового прес-гранулятора кормів:

а – прес-шнек; б – матриця

до 90–110 °С, стискається до визначеної щільності і продавлюється через отвори матриці. На виході отримується гранула – гаряча й пластична. При охолодженні й висиханні вона зберігає набуту при пресуванні форму.

За способом подачі сипучого корму для пресування до робочих органів гранулятори поділяють:

- на гравітаційні, в яких матеріал подається в камеру пресування під дією сили тяжіння;
- примусові, в яких матеріал подається різними пристроями.






Гравітаційні системи подачі сипучого корму застосовують у пресах з горизонтальними кільцевими або плоскими матрицями. Вони відрізняються простотою завантаження, однак не забезпечують рівномірного розподілу матеріалу по ширині матриці, оскільки під дією сили тяжіння він збирається в нижній частині кільцевої матриці, встановленої горизонтально. Останнє викликає нерівномірний знос матриці.


Технічних засобів для гранулювання кормів різних типів і виробників існує безліч [60–70]. Основні характеристики деяких із них наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Технічні засоби для гранулювання кормів

Назва або серія машини (виробник)	Характеристика
<p>НТ-20 (36) ТОВ «Артмаш»</p> 	<p>Продуктивність – 220 кг/ч (850 кг/ч). Потужність – 7,5 кВт (36 кВт). Розміри (мм) – 1000×430×950 (1300×580×1080). Маса (кг) – 190 (470)</p>
<p>УПГМ-150 (600)</p> 	<p>Продуктивність – 150 кг/ч (600 кг/ч). Потужність – 7,5 кВт (22,5 кВт). Розміри (мм) – 1100×520×1000 (1400×600×1200). Маса (кг) – 200 (500)</p>

Назва або серія машини (виробник)	Характеристика
<p>ППМ-2000</p> 	<p>Продуктивність – 2000 кг/ч. Потужність – 90 кВт. Розміри (мм) – 2350×1400×1750 мм. Маса (кг) – 3600</p>
<p>КЛ-400 (600)</p> 	<p>Продуктивність – 400 кг/ч (600 кг/ч). Потужність – 38 кВт (45 кВт). Розміри (мм) – 1600×850×1700 (1600×900×1700). Маса (кг) – 1200 (1250)</p>
<p>ГК-200 (700) ТОВ «Запоріжспецмаш»</p> 	<p>Продуктивність – 200 кг/ч (700 кг/ч). Потужність – 5,5 кВт (12 кВт). Розміри (мм) – 1110×420×870 (1430×620×1110). Маса (кг) – 250 (450)</p>
<p>ГШ-120 (180) НВФ «Сота-сталь»</p> 	<p>Продуктивність – 120 кг/ч (180 кг/ч). Потужність – 7,5 кВт (11 кВт). Розміри (мм) – 1150×500×1400 (1160×500×1400). Маса (кг) – 230 (270)</p>
<p>ПГ-150 ПАТ «Електромотор»</p> 	<p>Продуктивність – 150 кг/ч. Потужність – 7,5 кВт. Розміри (мм) – 1150×550×1000. Маса (кг) – 210</p>

Назва або серія машини (виробник)	Характеристика
ГРШ-50 ЗАТ «УкрСтройДім» 	Продуктивність – 50 кг/ч. Потужність – 4кВт. Розміри (мм) – 1440×570×970. Маса (кг) – 150
ГР-160 ВАТ «Гарантагро» 	Продуктивність – 160 кг/ч. Потужність – 7,5 кВт. Розміри (мм) – 1150×500×1400. Маса (кг) – 230
ПП «Лаврін» Г-200 (600) 	Продуктивність – 200 кг/ч (600 кг/ч). Потужність – 7,5 кВт (22,5 кВт). Розміри (мм) – 1100×600×1000 (1300×700×1700). Маса (кг) – 270 (740)

Для того щоб порівняти й оцінити ефективність технічних засобів для гранулювання кормів, розглянемо їх питому енергоємність у табл. 3.3.

З табл. 3.3 видно, що найменшою питомою енергоємністю при гранулюванні кормів і відповідно високою ефективністю відрізняється матричний прес-гранулятор ГК-200 (700).

Матричні і шнекові гранулятори належать до примусових систем подачі матеріалу і є машинами безперервної дії. Порівняно з пресами періодичної дії технологічний процес пресування корму протікає при постійних навантаженнях і в більш сприятливих умовах.

Основні переваги матричних і шнекових пресів – безперервність процесу, відсутність знакозмінних навантажень, менша матеріаломісткість. Велика кількість пресувальних каналів у матриці забезпечує достатню пропускну здатність преса. Недоліки пресів – енергоємність процесу, дроблення ущільнюваного матеріалу, підвищені вимоги до пресованих матеріалів за однорідністю подрібнення і рівномірністю

Таблиця 3.3

Питома енергоємність технічних засобів для гранулювання кормів

Тип машини	Назва, серія машини	Питома енергоємність, кВт·год/кг
Матричні (роликові) прес-гранулятори	НТ-20(36)	0,034(0,042)
	УПГМ-150(600)	0,05(0,038)
	КЛ-230В(400В)	0,037(0,033)
	ППМ-2000	0,045
	КЛ-400(600)	0,095(0,075)
	ГК-200 (700)	0,028(0,020)
	ПГ-150	0,05
Шнекові прес-гранулятори	ГШ-120(180)	0,05(0,061)
	ГРШ-50	0,050
	ГР-160	0,046

вологості, складність виготовлення матриць, високий нагрів як підшипникових, так і робочих вузлів. Питома енергоємність матричних пресів для гранулювання кормів дечим відрізняється від енергоємності шнекових, що зумовлює високу ефективність їх застосування.

На основі проведених патентно-інформаційних досліджень сучасних технологій та аналізу конструкцій робочих органів пресувальних машин встановлено, що найбільш прийнятною конструкцією може бути гвинтова установка. У зв'язку з цим розроблена конструктивна схема гвинтової установки для виготовлення пелет з білкової фракції макухи насіння олійних культур (рис. 3.27).

Установка для виготовлення пелет складається з рами 1, електродвигуна 2, шківів 3, підшипникового вузла 4, гвинта 5, циліндричного корпусу 6, завантажувального бункера 7, п'яти формуючих кулачків 8, циліндричної матриці 9, ножа 10.

Установка працює так. Уся установка встановлюється на рамі 1. Білкова фракція з макухи насіння олійних культур рівномірно подається до завантажувального бункера 7, з якого потрапляє на гвинт 5. Гвинт 5, виконуючи обертовий рух за допомогою системи електродвигуна 2, шківів 3 та підшипникового вузла 4, переміщує білкову фракцію до формуючих кулачків 8. При цьому відбувається ущільнення білкової фракції внаслідок зменшення висоти витків на гвинті 5. Потрапивши на формуючий кулачок 8, який виконує обертовий

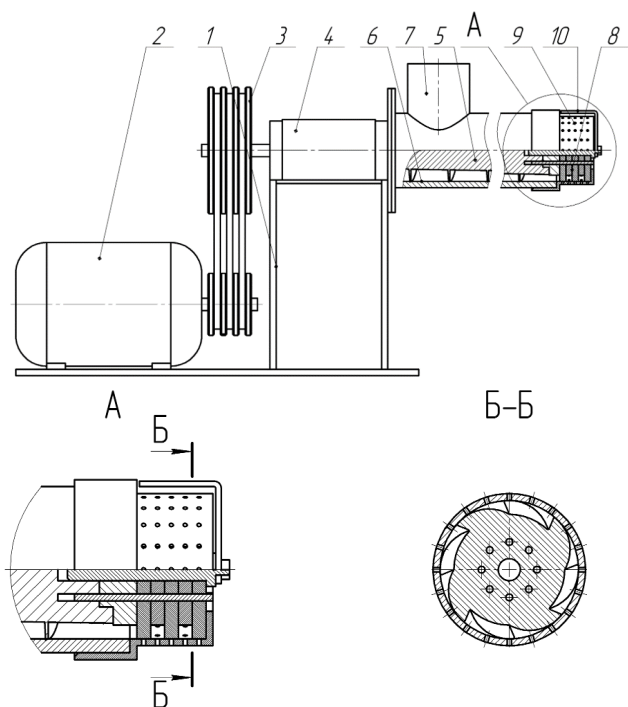


Рис. 3.27. Конструктивно-технологічна схема установки для виготовлення пелет (пелетератора): 1 – рама; 2 – електродвигун; 3 – шків; 4 – підшипниковий вузол; 5 – гвинт; 6 – циліндричний корпус; 7 – завантажувальний бункер; 8 – формуючий кулачок; 9 – циліндрична матриця; 10 – ніж

рух, білкова фракція ущільнюється й видавлюється крізь нерухому циліндричну матрицю 9. Далі ніж 10 зрізає ущільнену білкову фракцію, у результаті чого отримуємо циліндричні пелети.

3.2.2. Методика експериментальних досліджень технологічного процесу формування пелет з білкового порошку

Для проведення досліджень макетного зразка установки для виготовлення пелет виготовлено лабораторний стенд (рис. 3.28, 3.29), який складається з макетного зразка преса, матриці, гільзи та пуансона.

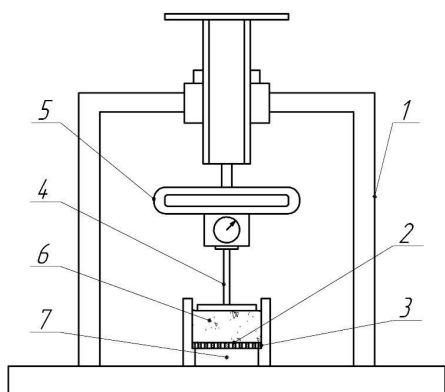


Рис. 3.28. Схема установки для проведення досліджень з виготовлення пелет: 1 – макетний зразок преса; 2 – матриця; 3 – гільза; 4 – пуансон; 5 – динамометр ДОСМ; 6 – білкова фракція; 7 – пелети



Рис. 3.29. Загальний вигляд установки для проведення досліджень з виготовлення пелет

Між пуансоном і гвинтом преса розміщений динамометр ДОСМ. Білкова фракція з макухи насіння соняшнику засипається в гільзу на поверхню матриці на задану висоту. За допомогою гвинта преса через динамометр і пуансон білкова фракція стискувалася й видавлювалася через отвір матриці. При цьому визначалася величина сили, необхідної для продавлювання досліджуваного матеріалу. При дослідженні брались матриці товщиною 4, 6 і 8 мм з діаметрами отворів 2, 4 і 6 мм. Після отримання пелети визначалась її питома вага.

Залежність сили видавлювання та питомої ваги пелети від діаметра отвору матриці та її товщини наведено в табл. 3.4.

Експериментальні дослідження макетного зразка установки для виготовлення пелет з білкової фракції макухи насіння олійних культур проводилися з використанням математичного методу планування експерименту, який дозволяє визначити математичні моделі процесів у вигляді рівнянь регресії (полінома) другого порядку [71].

Обробка результатів досліджень, проведених методом математичного факторного планування експериментів [72], виконувалась за допомогою комп'ютерної програми Mathematica.

Об'єкт дослідження – процес виготовлення пелет з білкової фракції макухи насіння олійних культур (соняшник, гірчиця, рижій) для птиці.

Таблиця 3.4

Залежність сили видавлювання Р та питомої ваги ρ пелети від товщини матриці t та діаметра d отвору

Товщина матриці t, мм	Діаметр отвору матриці d, мм	Показник	
		Сила видавлювання Р, Н	Питома вага ρ , кг/м ³
4	2	1234,8	624
4	4	901,6	569
4	6	715,4	482
6	2	1597,4	731
6	4	1254,4	628
6	6	921,2	534
8	2	1901,2	785
8	4	1558,2	711
8	6	1234,8	664

Предмет дослідження – закономірності впливу конструктивно-технологічних параметрів установки для виготовлення пелет на кількісні та якісні характеристики готової продукції.

Дослідження будуть проводитися з метою визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів установки для виготовлення пелет з білкової фракції макухи насіння для відповідної олійної культури.

Роботи проведено відповідно до ДСТУ 3973–2000 «Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Правила виконання науково-дослідних робіт» [73] і оформлено згідно з ДСТУ 3008–95 «Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення» [74].

Метою проведення досліджень є визначення раціональних параметрів робочих органів установки для виготовлення пелет з білкової фракції макухи насіння.

Програма досліджень містить методи визначення конструктивних, кінематичних і технологічних параметрів робочих органів установки для виготовлення пелет.

Програма досліджень передбачає:

1. Визначення залежності витрат потужності для виготовлення пелет від частоти обертів та конфігурації робочого органу, подачі матеріалу та його вологості.

2. Визначення залежності питомої ваги отриманих пелет від частоти обертів та конфігурації робочого органу, подачі матеріалу та його вологості.
3. Розрахунок похибок вимірювання контрольованих параметрів.
4. Оптимізація параметрів робочих органів установки для виготовлення пелет за показником питомих енерговитрат.

Для дослідження технологічного процесу виготовлення пелет з макухи насіння олійних культур розроблено конструктивно-технологічну схему й створено експериментальну установку (рис. 3.30) для його реалізації.

В установці для виготовлення пелет є можливість встановлення необхідної конфігурації розміщення формуючих кулачків 5.

До складу установки входить циліндрична матриця 6 з відповідними діаметрами отворів – 3 мм.

Установка для виготовлення пелет приєднується через вал привода 1 до мотор-редуктора максимальної потужності – 7,5 кВт, який з'єднується з частотним перетворювачем Danfoss VLT Micro Drive. Використовуючи частотний перетворювач, можливо змінювати частоту обертання вала привода в діапазоні – 0–100 об/хв. Схема електрична

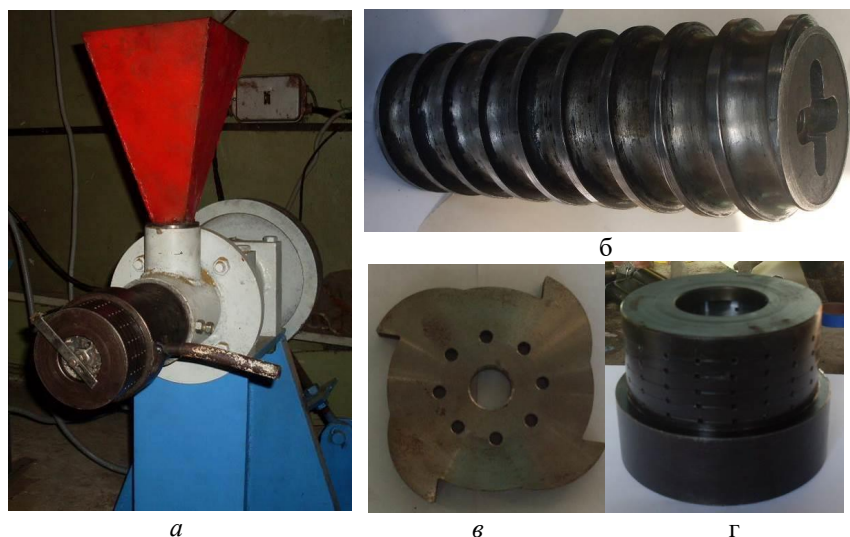


Рисунок 3.30 – Експериментальний зразок установки для виготовлення пелет (пелетератора): а – загальний вигляд; б – гвинт; в – формуючий кулачок; г – циліндрична матриця

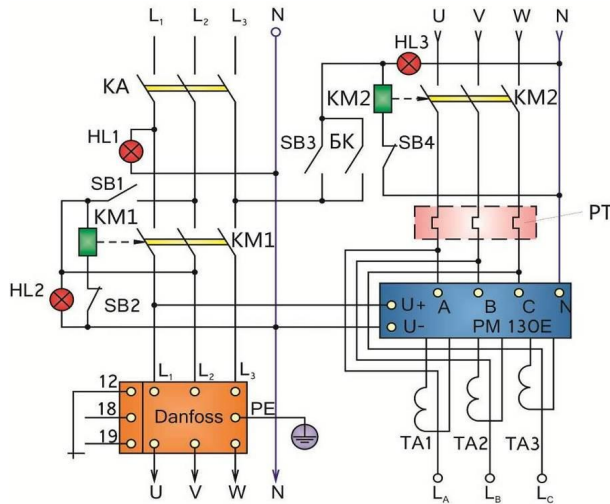
принципова підключення частотного перетворювача Danfoss VLT Micro Drive до електродвигуна мотор-редуктора наведена на рис. 3.31.

Задана подача білкової фракції до завантажувального бункера 4 здійснюється за допомогою регулівної заслінки. Швидкість подачі білкової фракції можна змінювати в діапазоні – 0–80 кг/год.

Перед початком експериментальних досліджень необхідно визначити умови проведення досліджень та підготувати білкову фракцію насіння олійних культур (соляшник, гірчиця, рижій) масою 10 кг для кожного досліду.

Для кожної порції білкової фракції насіння олійних культур необхідно визначити вологість за ГОСТ 27548–97 «Корми рослинні. Методи визначення вологи» [75], олійність за ГОСТ 13496.15–97 «Корми, комбікорми, комбікормова сировина. Методи визначення вмісту сирого жиру» [76], вміст білка за ДСТУ 7169: 2010 «Корми, комбікорми, комбікормова сировина. Методи визначення вмісту азоту і сирого протеїну» [77].

Об'ємна маса кожної порції білкової фракції насіння олійних культур визначається за методикою [78], яка передбачає зважування



L1, L2, L3, A, B, C – фазні проводи на вході та виході шафи керування відповідно; N – нульовий провід; KA – комутаційний апарат (автоматичний вимикач); KM1, KM2 – контактори; SB1, SB3 – кнопки «Пуск»; SB2, SB4 – кнопки «Стоп»

Рис. 3.31. Схема електрична принципова підключення частотного перетворювача Danfoss VLT Micro Drive до електродвигуна мотор-редуктора

маси білкової фракції, розміщеної в ящику розмірами не менше ніж 10 см × 10 см × 10 см без ущільнення та врівень з його краями, при вільному падінні білкової фракції з висоти 10 см від його верхнього краю. Маса зразка білкової фракції визначається шляхом статичного зважування на електронних вагах AA-200.

Перед кожним дослідом на установку для виготовлення пелет встановлюється відповідна конфігурація розташування формуючих кулачків.

Для проведення дослідів вмикається електродвигун мотор-редуктор і за допомогою частотного перетворювача Danfoss VLT Micro Drive встановлюється необхідна частота обертання вала привода установки для виготовлення пелет.

Білкова фракція масою 10 кг засипається в бункер і за допомогою відкаліброваної регулюючої заслінки встановлюється задана швидкість подачі матеріалу в установку для виготовлення пелет.

У процесі дослідження фіксується значення потужності електродвигуна, яка витрачається, на частотному перетворювачі Danfoss VLT Micro Drive і час проходження 10 кг матеріалу крізь установку для виготовлення пелет.

Тривалість виробничого циклу заміряється секундоміром. Початком виробничого циклу вважався процес завантаження вихідного матеріалу. Закінчення виробничого циклу – після завершення процесу накопичення пелет.

В кінці дослідів установка вимикається і готується до наступної процедури.

Отримані пелети підлягають визначенню геометричних розмірів, маси і насипної об'ємної маси. Олійною культурою обрано соняшник.

Дослідження будуть проводитися для конфігурації розташування формуючих кулачків (рис. 3.32) – формуючі кулачки розташовані послідовно без зміщення.

Факторами досліджень є частота обертів вала привода, швидкість подачі білкової фракції та її вологість. Інтервали і рівні варіювання факторами наведені в табл. 3.5.

Дослідження проводяться за планом трифакторного експерименту 3^3 , при варіюванні факторів використовувалась матриця планування експериментів Бокса-Бенкіна. Досліди проводяться у триразовій повторності.

За критерії досліджень обрано продуктивність виробничого процесу створення пелет Q , об'ємна маса пелет ρ і потужність електродвигуна P , що витрачається на здійснення процесу.

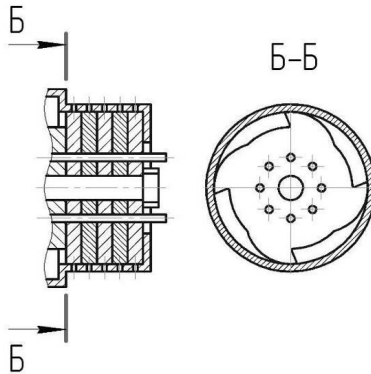


Рис. 3.32. Конфігурація розташування формуючих кулачків установки для виготовлення пелет

Таблиця 3.5

Інтервали і рівні варіювання факторів при експериментальних дослідженнях установки для виготовлення пелет

Позначення факторів		Найменування факторів та одиниця вимірювання	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Кодове	Натуральне		-1	0	+1	
x_1	q	Швидкість подачі матеріалу, кг/год	25	50	75	25
x_2	n	Частота обертів робочого органу, об/хв	30	60	90	30
x_3	W	Вологість білкової фракції, %	20	30	40	10

Продуктивність виробничого процесу визначається шляхом розрахунку за формулою:

$$Q = m / t, \quad (3.9)$$

де m – маса білкової фракції, $m = 10$ кг;
 t – тривалість виробничого циклу, год.

Критерієм оптимізації факторів досліджень обрано питомі енерговитрати, які визначаються за формулою:

$$E = P / Q. \quad (3.10)$$

3.3.3. Результати експериментальних досліджень технологічного процесу формування пелет з білкового порошку

У результаті пресування білкового порошку на лабораторному стенді отримані пелети з макухи насіння гірчиці й соняшнику [79–85].

У результаті обробки експериментальних даних одержані математичні моделі залежності сили, необхідної для продавлювання білкової фракції через отвори матриць, та питомої ваги отриманих при цьому пелет (рис. 3.33, 3.34):

$$P = 834,634 + 190,284 d - 158,841 t - 9,1875 d t + 7,35 t^2 \quad (3.11)$$

$$\rho = 649,0556 + 10,6667 d - 47,5417 t + 2,0417 d^2 + 1,3125 d t, \quad (3.12)$$

де P – сила видавлювання, Н;
 ρ – питома вага пелет, кг/м³;
 d – діаметр отвору матриці, мм;
 t – товщина матриці, мм.

Відповідно до проведених досліджень можна зробити висновок, що при збільшенні товщини матриці і зменшенні діаметра отворів сила видавлювання білкового порошку й питома вага отриманих пелет збільшуються.

Дослідження конструктивно-технологічних параметрів установки для виготовлення пелет проводились із застосуванням методу

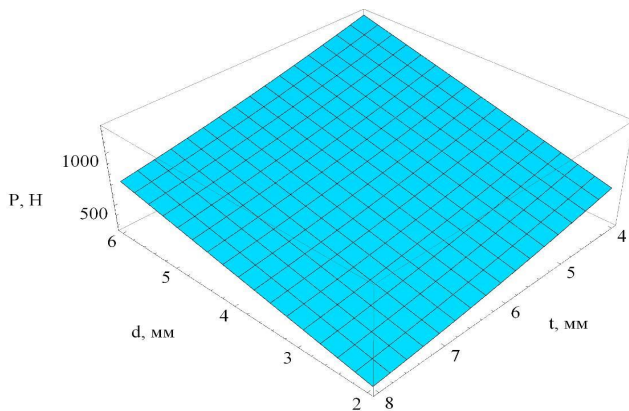


Рис. 3.33. Залежність сили видавлювання P від діаметра отворів матриці d та товщини матриці t

математичного планування багатofакторного експерименту, який дозволяє визначити математичні моделі процесів у вигляді рівнянь регресії [86, 87].

Загальний вигляд процесу проведення експериментальних досліджень наведено на рис. 3.35, зразки отриманих пелет з білкової фракції макухи соняшнику – на рис. 3.36.

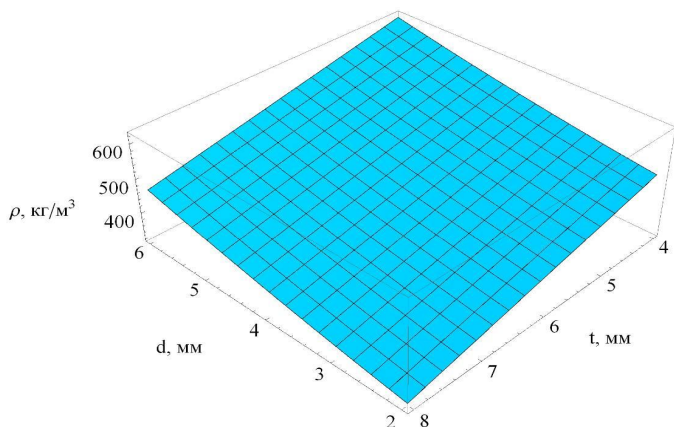


Рис. 3.34. Залежність питомої ваги пелет ρ від діаметра отворів матриці d та товщина матриці t



Рис. 3.35. Загальний вигляд процесу проведення експериментальних досліджень



Рис. 3.36. Зразки отриманих пелет з білкової фракції макухи соняшнику

Згідно з результатами досліджень створено математичну модель впливу досліджуваних факторів на ефективність технологічного процесу формування пелет з білкового порошку.

Отримана математична модель впливу досліджуваних факторів на об'ємну масу пелет мала вигляд:

$$\rho = -119,194 - 0,0302469 n^2 + 6,50741 n + 0,00722222 W n + 21,8917 W - 0,217222 W^2. \quad (3.13)$$

Аналізуючи рівняння (3.13), можна стверджувати, що на об'ємну масу пелет впливає лише вологість вихідного матеріалу і частота обертів робочого органу. При цьому зі збільшенням зазначених факторів збільшується й об'ємна маса пелет. Оптимальним значенням для цього рівняння є:

$$\rho (n = 90 \text{ об/хв}, W = 40\%) = 775 \text{ кг/м}^3. \quad (3.14)$$

Графічна інтерпретація рівняння 3.13 наведена на рис. 3.37.

Отримана математична модель впливу досліджуваних факторів на продуктивність виробничого процесу створення пелет мала вигляд:

$$Q = -133,229 - 0,0105833 n^2 + 0,905278 n + 0,0102778 q n + 0,586167 q - 0,00837333 q^2 + 7,47125 W - 0,0983333 W^2. \quad (3.15)$$

Графічна інтерпретація рівняння (3.15) наведена на рис. 3.38.

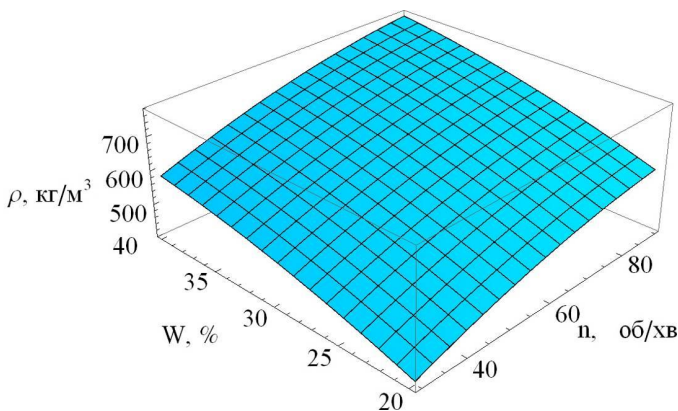


Рис. 3.37. Залежність об'ємної маси пелет від факторів, що досліджуються

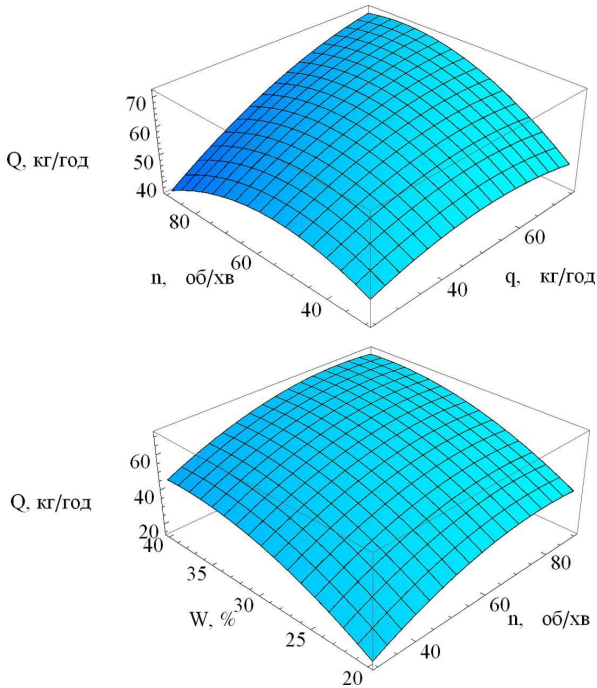


Рис. 3.38. Залежність продуктивності виробничого процесу від факторів, що досліджуються при фіксованих оптимальних значеннях (3.15)

Аналізуючи рівняння (3.15), можна стверджувати, що на продуктивність виробничого процесу створення пелет впливають всі фактори. При цьому зі збільшенням вологості вихідного матеріалу збільшується і продуктивність, а при варіюванні значень частоти обертів робочого органу й подачі вихідного матеріалу спостерігається максимум. Оптимальним значенням для цього рівняння є:

$$Q (q = 75 \text{ кг/год}, n = 79,2 \text{ об/хв}, W = 37,9\%) = 71,91 \text{ кг/год.} \quad (3.16)$$

Отримана математична модель впливу досліджуваних факторів на споживану потужність електродвигуна у розкодованому вигляді мала вигляд:

$$P = 8962,92 + 1,17716 n^2 - 137,718 n + 0,643333 q n - 38,6111 q + 0,229778 q^2 - 320,792 W + 6,17778 W^2. \quad (3.17)$$

Графічна інтерпретація рівняння (3.17) наведена на рис. 3.39.

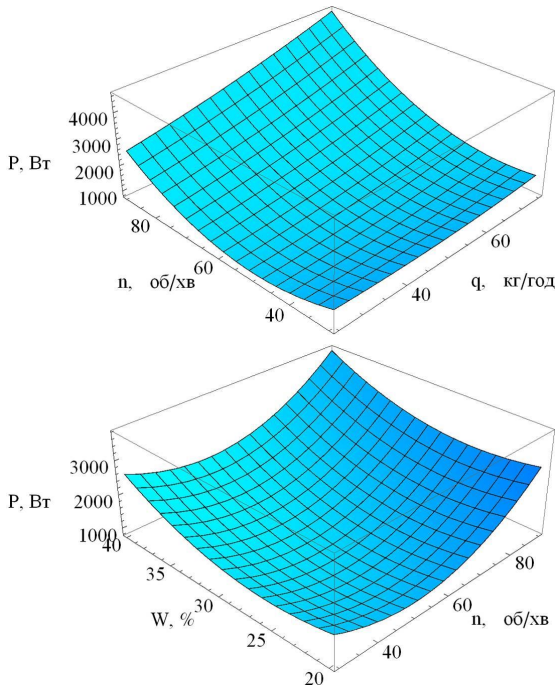


Рис. 3.39. Залежність споживаної потужності електродвигуна від факторів, що досліджуються при фіксованих оптимальних значеннях (3.17)

Аналізуючи рівняння (3.17), можна стверджувати, що на споживану потужність електродвигуна впливають всі фактори. При цьому зі збільшенням вологості вихідного матеріалу збільшується і потужність, а при варіюванні значень частоти обертів робочого органу і подачі вихідного матеріалу спостерігається мінімум. Оптимальним значенням для цього рівняння є:

$$P(q = 25 \text{ кг/год}, n = 51,7 \text{ об/хв}, W = 25,9\%) = 834 \text{ кВт}. \quad (3.18)$$

Завданням розв'язання компромісної задачі була мінімізація витрат споживаної потужності електродвигуна при максимальному значенні продуктивності пелетератора. При цьому об'ємна маса отриманих пелет не повинна бути меншою за 600 кг/м^3 :

$$\begin{cases} P(q, n, W) \rightarrow \min; \\ Q(q, n, W) \rightarrow \max; \\ \rho(q, n, W) > 600 \text{ кг/м}^3. \end{cases} \quad (3.19)$$

Взявши відношення споживаної потужності до продуктивності, перетворимо поставлену задачу (3.19) до вигляду:

$$\begin{cases} E(q, n, W) = \frac{P(q, n, W)}{Q(q, n, W)} \rightarrow \min; \\ \rho(q, n, W) > 600 \text{ кг/м}^3. \end{cases} \quad (20)$$

Розв'язок задачі (3.20) за допомогою програмного пакета Mathematica дозволяє визначити оптимальні конструктивно-технологічні параметри установки для виготовлення пелет:

$$\begin{aligned} P(q = 35,7 \text{ кг/год}, n = 50,5 \text{ об/хв}, W = 28,9\%) &= 20,2 \text{ Вт} \cdot \text{год/кг}, \\ \rho(q = 35,7 \text{ кг/год}, n = 50,5 \text{ об/хв}, W = 28,9\%) &= 601 \text{ кг/м}^3. \end{aligned} \quad (3.21)$$

За таких оптимальних значень конструктивно-технологічних параметрів споживана потужність електродвигуна установки для виготовлення пелет становить 973 Вт, а її продуктивність – 48 кг/год.

3.3. Кавітаційний диспергатор-гомогенізатор для приготування рідких харчових продуктів і кормів

Автори: Алієв Е. Б., Малєгін Р. Д.

3.3.1. Аналіз сучасних технологій та устаткування для переробки кормів на принципі кавітації

Якість харчових продуктів і кормів основним чином визначається технологічними операціями при їх приготуванні. По-перше, харчові продукти й корми повинні бути однорідними за фракційним складом. Тобто процес подрібнення повинен забезпечувати однаковий фракційний склад за кожним із компонентів рослинної сировини, що входить до складу корму. По-друге, харчові продукти й корми повинні бути однорідними за розподілом компонентів у суміші. Тобто процес змішування повинен забезпечувати високий коефіцієнт варіації розподілу компонентів рослинної сировини в усьому об'ємі (або масі) суміші. По-третє, харчові продукти й корми повинні зберігати всі поживні речовини й вітамінні комплекси, не містити шкідливих речовин, забезпечуючи вимоги безвідходності трансформації рослинної сировини вздовж харчового ланцюга. Тобто приготування харчових

продуктів і кормів повинно містити такі технологічні процеси, які задовольняють зазначеним умовам [88–90].

Вищезазначені вимоги відповідають процесу диспергування й гомогенізації кормових компонентів із застосуванням кавітаційної обробки. Згідно з [91] диспергування (dispersion) – технологічний процес тонкого подрібнення та розподілу в об'ємі твердого матеріалу, рідини або газу, в результаті якого виникають дисперсні системи: порошки, суспензії, емульсії, аерозолі. Своєю чергою гомогенізація (homogenization) – технологічний процес, в ході якого зменшується ступінь неоднорідності розподілу компонентів і фаз в об'ємі гетерофазної системи [91]. Кавітація (cavitation) – фізичний процес утворення бульбашок (каверн) у рідких середовищах, з подальшим їх спаданням і вивільненням великої кількості енергії (ударна хвиля), що виникає в результаті зовнішніх фізичних впливів [92]. Тобто кавітаційна обробка компонентів харчових продуктів і кормів дозволяє їх подрібнювати шляхом дії ударної хвилі.

На сьогодні існує багато диспергаторів і гомогенізаторів, що працюють на основі ефекту кавітації, у тому числі і для переробки харчових продуктів і кормових компонентів на продукцію підвищеної засвоюваності. В основному ці гідродинамічні установки призначені для приготування вологих паст із зернових, олійних і бобових культур, кормів тваринного походження для молодняку і дорослих сільськогосподарських тварин з одночасним їх знезараженням і руйнуванням токсичних речовин (мікотоксинів і алкалоїдів) у вигляді суспензій і емульсій [93].

Відомі такі типи устаткування для диспергування [94]:

- подрібнення робочими органами, що мелють (кульові, бісерні, вібраційні, дезінтегратори);
- пристрої самоподрібнення (барабанні, відцентрові, струменеві);
- вибухові подрібнювачі (зі скиданням тиску, з використанням вибухових речовин).

Недоліки цих типів пристроїв: знос робочих органів, що мелють; забруднення продуктами зносу подрібнюваного матеріалу; велика енергоємність диспергування; низький ККД, агрегація (злипання) частинок при збільшенні дисперсності матеріалу.

Останніми роками з'явилося устаткування для диспергування з одночасною гомогенізацією [31]:

- ультразвукові пристрої;

- ультразвукові пристрої кавітацій;
- електрогідролічні пристрої;
- пристрої роторних пульсацій;
- гідроударні установки.

Ультразвукові пристрої застосовуються рідко і в специфічних умовах (наприклад, для гомогенізації майонезу), а електрогідролічні пристрої поки не знайшли застосування. Найбільшого поширення за кордоном набули пристрої роторних пульсацій і ті, що приходять їм на зміну – гідроударні установки.

Відбувається закономірний перехід до способу диспергування компонентів у двофазному (компонент + рідина) середовищі, що дозволяє сумістити процеси диспергування й гомогенізації в одному апараті. Рідиною може бути вода або будь-яка інша рідина, наприклад: олія, що виділяється при подрібненні олійних культур, сік при переробці помідорів, гороху тощо. Це дає можливість використовувати фізичні властивості другої фази (нестисливість, закони Паскаля і Бернуллі) і застосувати нові фізичні ефекти (гідролічний удар, кавітацію, імпульси високого тиску, турбулентність).

Обробка кавітацією дозволяє провести подрібнення сировини й подальшу гомогенізацію рідких харчових продуктів і кормосумішей, що дає можливість проводити їх транспортування за стандартними системами рідкої роздачі.

Спосіб диспергування матеріалу у двофазному середовищі позбавлений недоліків сухого способу диспергування, оскільки рідина не так сильно зношує матеріал робочих органів, не забруднює харчову й кормову суміш, запобігає агрегації за рахунок зменшення поверхневої енергії твердої фази (цей ефект посилюється додаванням поверхнево-активних речовин).

Основними елементами найпоширеніших конструкцій кавітаційних гідроударних диспергаторів є ротор і статор (рис. 3.40) [95]. У роторі по колу розташовані резонансні камери (резонатори), у статорі – отвори – конфузори. При обертанні ротора відбувається періодичне перекриття вихідних отворів – резонаторів. Частота обертання ротора зазвичай перебуває в межах 3000–4000 об/хв. Подрібнення відбувається шляхом дії на частинку кавітації, а також подвійного (прямого і зворотного) гідролічного удару при перериванні потоку пульпи із заданою частотою. Частота спеціально підбирається рівною власній частоті ротора. Дія гідролічного удару має пульсуючий характер. Руйновані частинки піддаються гідролічному удару в резонансних камерах (резонаторах). Внаслідок збігу власної частоти резонато-



Рис. 3.40. Робочі органи кавітаційних гідроударних диспергаторів

рів з частотою проходження імпульсів тиску в камерах відбувається багаторазове збільшення (у 10 разів порівняно з апаратами роторних пульсацій) амплітуди значення тиску. Гідродинамічні процеси в установці супроводжуються розвиненою турбулентністю. Це сприяє високому ступеню гомогенізації оброблюваного матеріалу.

Принцип кавітаційної переробки харчових і кормових компонентів застосовували багато розробників техніки і нових технологій кормоприготування. В Україні – це дослідження, пов’язані зі створенням і випробовуванням кормоприготувальних агрегатів серії АКГСМ «Мрія», в Росії – роторно-пульсаційних апаратів [96] (Інститут органічної та фізичної хімії ім. А. Е. Арбузова КазНЦ РАН) для одержання кормових добавок з амаранта та інших зернових матеріалів. На особливу увагу заслуговують дослідження Російської компанії ТОВ «Кавікорм інжиніринг», що виконуються спільно з науковцями Всеросійського інституту тваринництва Россільгоспакадемії і якими створено й пущено в експлуатацію завод з виробництва кормових концентратів у селі Лебязьє Мелекеського району Ульяновської області [97]. Технологія Savikorm на базі роторного подрібнювача-диспергатора «РІД-2» заснована на принципі енергоефективного отримання комплексних кормових добавок з високим вмістом збалансованого за незамінними амінокислотами білка, легкозасвоюваних вуглеводів, вітамінів і біологічно активних речовин з відходів харчової переробки [98].

Технологія годівлі Savikorm – комплексне інноваційне промислове рішення, що дозволяє готувати повнораціонні вологі гомогенні корми безпосередньо в кормоцехах свинокомплексів [99]. Технологія

ґрунтується на кавітаційному способі приготування кормової суміші, що дозволяє значно зменшити витрати кормів внаслідок збільшення засвоюваності поживних речовин і зниження енерговитрат на травлення. Відмінною особливістю ліній кормоприготування є можливість технологічної й ефективної переробки зелених кормів, консервованих продуктів з них. Технологія дозволяє переробляти траву, сіно, солому, сінаж, силос, корене- і бульбоплоди. Обробка кавітацією (рис. 3.41) дозволяє провести подрібнення сировини і подальшу гомогенізацію кормосумішей, що дає можливість проводити їх транспортування по стандартних системах рідкої кормороздачі. Крім зелених кормів лінії кормоприготування Cavikorm дозволяють переробляти й безпечно включати в раціони годівлі такі відходи харчових і переробних виробництв, як відпрацьована пивна дробина, сирі пивні дріжджі, післяспиртова барда, патока, молочна сироватка, меляса, буряковий жом, макухи й шроти олійних культур, висівки, кормові мучки, боєнські й рибні відходи. У господарств, що упровадили технологію Cavikorm, крім традиційного застосування ячменю і пшениці з'являється можливість ширшого використання жита, тритикале, сої в нативному вигляді, кормових бобів, люпину й нуту.

Лінії кормоприготування Cavikorm комплектуються бункерами і контейнерами, що дозволяють підтримувати трьох- або (за бажанням замовника) семиденний запас усіх компонентів сировини. Устаткування й шнеки, розташовані поза опалювальними приміщеннями, теплоізолюються й оснащуються системою підігріву для роботи в холодну пору року. За необхідності переробки сировини польового кормовиробництва лінії обладнуються вузлами попереднього очищення й подрібнення інгредієнтів. Після попередньої обробки компоненти надходять на дозування, яке проводиться автоматично на електронних вагах відповідно до заданих рецептур. Зважена сировина подається в ділянку кормоприготування.

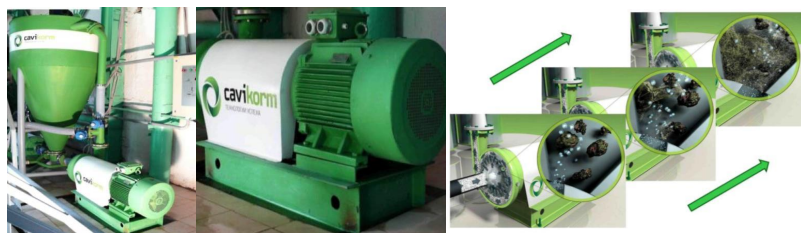


Рис. 3.41. Установка приготування кормів «Cavikorm»

Для встановлення основних напрямків удосконалення технічних засобів для гомогенізації, диспергації та кавітації рідких кормів проведено відповідний патентний пошук.

Відомий роторний гомогенізатор (Пат. України № 65406, кл. B01F 7/00, B01F 13/06, 2006) [100], що містить завантажувальний контейнер, корпус з вихідним патрубком, всередині корпусу розміщені коаксіально до осі вала ніж, статори, ротор та диск з лопатками, завантажувальний контейнер виконаний у вигляді бака з ущільненою кришкою та сполучений з вакуум-насосом, причому у верхній частині завантажувального контейнера додатково встановлений тарілчастий розподільник рідини, що сполучений з вихідним патрубком за допомогою трубопроводу. До недоліків цього обладнання слід віднести те, що в процесі циркуляції рідинної суміші неможливо встановити якість її диспергування й гомогенізації. Це призводить до підвищення кількості циклів проходження рідинної суміші крізь робочі органи, що спричиняє підвищення витрат енергії і зниження продуктивності. Окрім того, ускладненість конструкції шляхом введення вакуум-насоса призводить до підвищення металоємності конструкції і збільшення енерговитрат. Інтенсифікацію кавітаційного ефекту в процесі диспергування можна досягти шляхом зміни конструкції робочих органів (ротора і статора).

Відомий роторний кавітаційний диспергатор (пат. України № 97802, кл. B01F 7/00, 2015) [101], що містить робочу камеру з конусоподібною напрямною, закріплені на привідному валу послідовно два ряди ножів, ротор з отворами та лопатями, статор з кавітаційними пристроями, ущільнювач потоку рідкого середовища, розміщений співвідносно з конусоподібною напрямною на рівні її верхньої частини з можливістю зворотно-поступального переміщення у вертикальній площині та виконаний у вигляді зрізаного конуса, перевернутого більшою основою вверху, з бічними поверхнями, паралельними бічним поверхням конусоподібної напрямної. До недоліків цього обладнання слід віднести відсутність можливості підігріву рідинної суміші та автоматичного завантаження рідких і сипких компонентів суміші, що зменшує продуктивність виконання технологічного процесу. Окрім того, додаткове забезпечення диспергатора ущільнювачем потоку рідкого середовища ускладнює конструкцію і процес налаштування формуючої безперервної потокової подачі оброблюваного рідкого середовища в зону дії робочих органів через відсутність зворотних зв'язків і відповідної системи керування. Це призводить до низької продуктивності процесу кавітаційного диспергування рідкої суміші.

Відомий насос-гомогенізатор (пат. України № 57304, кл. 7 A01J11/16, 2003) [102], що має корпус із вхідним і напірним патрубком-

ми, рухливий і нерухомий ротори, оснащені лопатками з прорізами, рухливий ротор складається з основного покривного й лопатевого дисків, причому лопаті лопатевого диска мають криволінійну форму, а нерухомий ротор сполучений з корпусом, на внутрішніх стінках якого по обидва боки лопатевого диска виконані виступи, причому на усмоктувальній периферійній частині корпусу додатково встановлені лопатки, спрямовані по ходу обертання рухливого ротора. Окрім того, в лопатевому диску виконані прорізи, а виступи нерухомого ротора розташовані в шаховому порядку щодо прорізів лопатевого диска. Основне завдання цього обладнання – перекачування рідкої суміші з одночасною гомогенізацією, що унеможлиблює процес диспергування великих частинок сипкого матеріалу, які містяться в рідкій суміші, через утворення заторів при проходженні крізь отвори ротора. Окрім того, наявність одноетапної гомогенізації рідинної суміші під час проходження крізь отвори ротора не забезпечує високу ефективність цього процесу, що знижує якість отриманого продукту.

3.3.2. Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми кавітаційного диспергатор-гомогенізатора

Для реалізації процесу кавітаційного диспергування і гомогенізації рідких кормів запропонована наступна конструктивно-технологічна схема відповідного технічного засобу (рис. 3.42).

Роторний кавітаційний диспергатор-гомогенізатор складається із завантажувального контейнера 1 у вигляді бака з кришкою 2, що має вакуумне ущільнення, вихідного патрубка 3, вхідного патрубка для сипких компонентів 4 та вхідного патрубка для рідких компонентів 5.

На дні завантажувального контейнера 1 жорстко закріплений статор 6 (рис. 3.43), який має вигляд круглого диска із зубчастими елементами, що розмічені на концентричних окружностях. Отвори між зубчастими елементами статора 6 утворюють дифузори 7. В середині статора 6 наявний наскрізний отвір 8. Під статором 6 встановлений ротор 9 (рис. 3.44), виконаний у вигляді круглого диска із зубчастими елементами, що розмічені на концентричних окружностях. Отвори між зубчастими елементами ротора 9 утворюють резонатори 10. В середині ротора 9 розташовані лопаті 11, розмішені під кутом до його радіуса. Ротор 9 закріплений на валу 12 та підшипникового вузла 13, який своєю чергою встановлений знизу завантажувального контейнера 1. Вал 12-ти підшипникового вузла 13 приєднаний до вала асинхронного електродвигуна 14. До вихідного патрубка 3 приєднаний кран з електроприводом 15. Далі, після крану з електроприводом 15

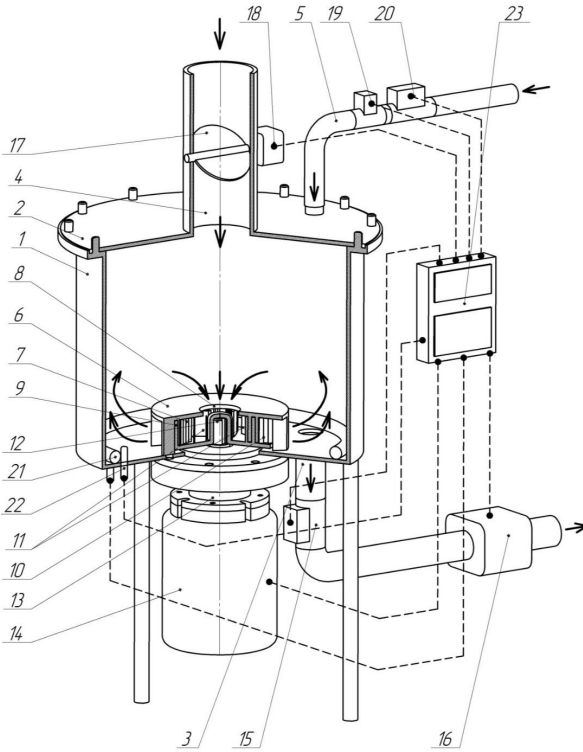


Рис. 3.42. Конструктивно-технологічна схема роторного кавітаційного диспергатор-гомогенізатора

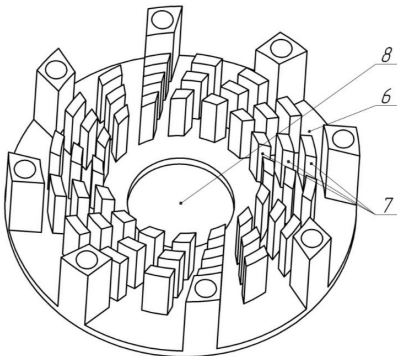


Рис. 3.43. Загальний вигляд статора роторного кавітаційного диспергатор-гомогенізатора

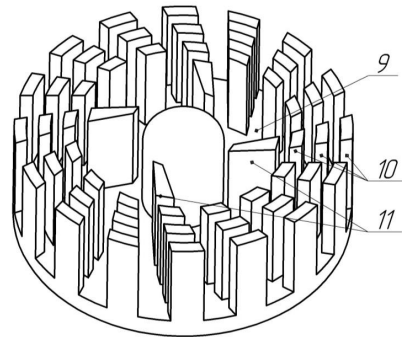


Рис. 3.44. Загальний вигляд ротора роторного кавітаційного диспергатор-гомогенізатора

встановлений електричний насос 16 для перекачування готової суміші до наступного контейнера (на рис. 3.42 не позначений).

У вхідному патрубку для сипких компонентів 4 встановлена заслінка 17, вал якої приєднано до вала крокового двигуна 18. До вхідного патрубка для рідких компонентів 5 послідовно приєднаний датчик витрат рідини 19 і кран з електроприводом 20. Далі, кран з електроприводом 20 приєднаний патрубком до резервуара з рідиною (на рис. 3.42 не позначений). На дні завантажувального контейнера 1 розміщений нагрівач 21 і датчик температури 22. Асинхронний електродвигун 14, кран з електроприводом 15, електричний насос 16, кроковий двигун 18, датчик витрат рідини 19, кран з електроприводом 20, нагрівач 21, датчик температури 22 через засоби електричних проводів приєднаний до блоку керування 23, на якому встановлено відповідне програмне забезпечення, алгоритм якого наведено на рис. 3.45 [103].

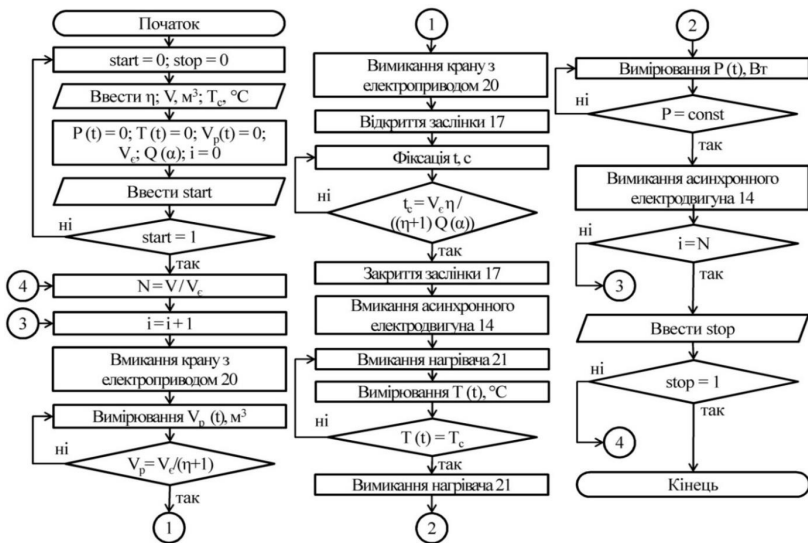


Рис. 3.45. Алгоритм програмного забезпечення блоку керування роторним кавітаційним диспергатор-гомогенізатором:

start – змінна запуску алгоритму; stop – змінна зупинки алгоритму; η – задане співвідношення об'єму сипкого компонента до об'єму рідкого компонента; V – заданий об'єм необхідної суміші, м^3 ; T_c – задана температура суміші, $^{\circ}\text{C}$; V_c – об'єм завантажувального контейнера 1, м^3 ; V_p – об'єм рідкого компонента, м^3 ; α – кут нахилу заслінки, $^{\circ}$; $Q(\alpha)$ – об'ємні витрати сипкого компонента, $\text{м}^3/\text{с}$; t_c – час заповнення завантажувального контейнера 1; T – температура суміші, $^{\circ}\text{C}$; P – потужність асинхронного електродвигуна 14, що споживається, Вт; N – кількість циклів; i – номер циклу

Процес диспергування, емульгування та гомогенізації компонентів суміші в рідкому середовищі на роторному кавітаційному диспергатор-гомогенізаторі відбувається в такий спосіб. Спочатку оператор роторного кавітаційного диспергатор-гомогенізатора задає на блоці керування 23 вихідні дані (співвідношення об'єму сипкого компонента до об'єму рідкого компонента η , об'єм необхідної суміші V , температура суміші T_c) і запускає процес.

Блок керування 23 передає сигнал засобами електричних проводів до крана з електроприводом 20. У результаті цього кран з електроприводом 20 відкривається і рідкий компонент починає переміщуватися через датчик витрат рідини 19 і вхідний патрубок для рідких компонентів 5 у завантажувальний контейнер 1. Датчик витрат рідини 19 при цьому фіксує об'єм рідкого компонента V_p і передає його значення до блоку керування 23. В момент виконання умови $V_p = V_c / (\eta + 1)$, де V_c – об'єм завантажувального контейнера 1, блоку керування 23 передає сигнал засобами електричних проводів до крана з електроприводом 20 і вимикає його. Далі блок керування 23 передає сигнал засобами електричних проводів до крокового двигуна 18, який відкриває заслінку 17 на кут нахилу α . Кут нахилу α заслінки 17 є відкалібрований до об'ємних витрат сипкого компонента $Q(\alpha)$. Сипкий компонент переміщується через заслінку 17 і вхідний патрубок для сипких компонентів 4, розміщений у центрі кришки 2, до завантажувального контейнера 1. Через час $t_c = V_c \eta / ((\eta + 1) Q(\alpha))$ блок керування 23 передає сигнал засобами електричних проводів до крокового двигуна 18, який закриває заслінку 17.

Після цього блок керування 23 передає електричний струм електромережі засобами електричних проводів до асинхронного електродвигуна 14, в результаті чого він вмикається. Вал асинхронного електродвигуна 14 приводить в дію вал 12-ти підшипникового вузла 13 і відповідно до цього ротор 9 починає виконувати обертовий рух навколо власної осі. Жорстко розташовані лопаті 11 на роторі 9 утворюють різницю тисків у наскрізному отворі 8 статора 6 та завантажувальному резервуарі 1, що спричиняє втягування суміші в наскрізний отвір 8 статора 6. У результаті обертання ротора 9 резонатори 10 і дифузори 7 періодично збігаються один з одним, утворюючи при цьому наскрізні отвори, через які суміш починає переміщуватися під дією відцентрової сили до стінок завантажувального контейнера 1 (рух суміші на рис. 3.42 показано стрілками). При перекритті резонаторів 10 і дифузоров 7 відбувається різке підвищення тиску – прямий гідравлічний удар. Таким чином, суміш послідовно обробляється гід-

роударами. У момент суміщення резонаторів 10 і дифузорів 7 суміш отримує велику кінетичну енергію в отворах. При цьому відбувається різке падіння тиску з одночасним підвищенням швидкості руху суміші. Зменшення тиску викликає появу парових бульбашок.

На вході в дифузори 7 утворюються кільцеві зони, в яких відбувається схлопування парових бульбашок суміші, що зумовлює додаткове руйнування від знакозмінних навантажень. Окрім того, потік суміші насичений кавітаційними паровими бульбашками, з великою швидкістю врізається в стаціонарний шар суміші. Напроти кожного отвору утворюються коловоротні зони схлопуваних кавітаційних парових бульбашок. Велика сумарна кількість утворення кавітаційних бульбашок забезпечує інтенсивний дифузійний обмін між рідкою та газовою фазами, в результаті чого відбувається гомогенізація, розігрівання та знезараження оброблюваного середовища й прискорення активуючих реакцій. Внаслідок постійного руху компонентів суміші з центру завантажувальної ємності 1 через наскрізний отвір 8 статора 6, резонатори 10 і дифузори 7 до стінок завантажувального контейнера 1 відбувається постійне їх перемішування і поступове диспергування.

Процес нагрівання суміші до заданої температури T_c відбувається так. Блок керування 23 засобами електричних проводів вмикає нагрівач 21. Датчик температури 22 визначає температуру суміші в завантажувальному контейнері 1 і передає дані засобами електричних проводів до блока керування 23. У разі досягнення заданої температури T_c блок керування 23 засобами електричних проводів вимикає нагрівач 21.

Під час процесу диспергування, емульгування та гомогенізації компонентів суміші в рідкому середовищі на роторному кавітаційному диспергатор-гомогенізаторі блок керування 23 вимірює динаміку потужності $P(t)$ асинхронного електродвигуна 14, що споживається. На початку процесу, потужність має найбільше значення, оскільки відбувається інтенсивне диспергування сипкого компонента суміші, що спричиняє зменшення розмірів його частинок. Далі значення потужності починає зменшуватися й досягає стабільності $P = \text{const}$. Це пов'язано з тим, що весь сипкий компонент подрібнився й рівномірно розподілився по всьому завантажувальному контейнеру 1, тобто суміш є однорідною. В момент коли $P = \text{const}$ і температура суміші досягає значення T_c блок керування 23 вимикає асинхронний електродвигун 14.

Наступним етапом процесу є вивантаження суміші. Блок керування 23 засобами електричних проводів передає сигнал до крана з електроприводом 15, тим самим відкриваючи його. Далі блок керування 23 засобами електричних проводів вмикає електричний насос 16. При цьому готова суміш вивільняється із завантажувального контейнера 1 і перекачується по вихідному патрубку 3 через кран з електроприводом 15 і електричний насос 16 до наступного резервуара. Після вивільнення всієї суміші із завантажувального контейнера 1 блок керування 23 засобами електричних проводів вмикає електричний насос 16 і закриває кран з електроприводом 15.

Після цього цикл повторюється $N = V / V_{\epsilon}$ разів з моменту завантаження компонентів у завантажувальний контейнер 1.

Використання роторного кавітаційного диспергатор-гомогенізатора, за рахунок встановленого крана з електроприводом і електричного насоса, які послідовно встановлені після вихідного патрубка; заслінки з приводом крокового двигуна, встановленої в порожнині вхідного патрубка для сипких компонентів; датчиком витрат рідини і крана з електроприводом, послідовно встановлених до вхідного патрубка для рідких компонентів; нагрівача й датчика температури, розмішених на дні завантажувального контейнера; блока керування, приєднаного через засоби електричних проводів до асинхронного електродвигуна, крана з електроприводом, електричного насоса, крокового двигуна, датчика витрат рідини, нагрівача, датчика температури, дозволяє одночасно виконувати технологічні процеси диспергування, емульгування та гомогенізації компонентів суміші в рідкому середовищі з вищою продуктивністю, якістю й меншими енерговитратами.

3.3.3. Методика чисельного моделювання кавітаційного диспергатор-гомогенізатора

Для проведення моделювання в програмному пакеті Star CCM+ була побудована сітка CAD-моделі ділянки між ротором, статором і робочою камерою роторного кавітаційного диспергатор-гомогенізатора із базовим розміром комірки 0,001 м. Для моделювання були прийняті геометричні параметри ротора і статора роторного кавітаційного диспергатор-гомогенізатора (рис. 3.46, 3.47). Робоча камера прийнята діаметром 340 мм і висотою 270 мм. Абсолютна шорсткість поверхонь ротора й статора становить $\epsilon = 2,5 \cdot 10^{-6}$ м.

Чисельне моделювання проводилося із застосуванням моделі Ейлеревої багатофазності, багатофазної взаємодії і метода об'ємної

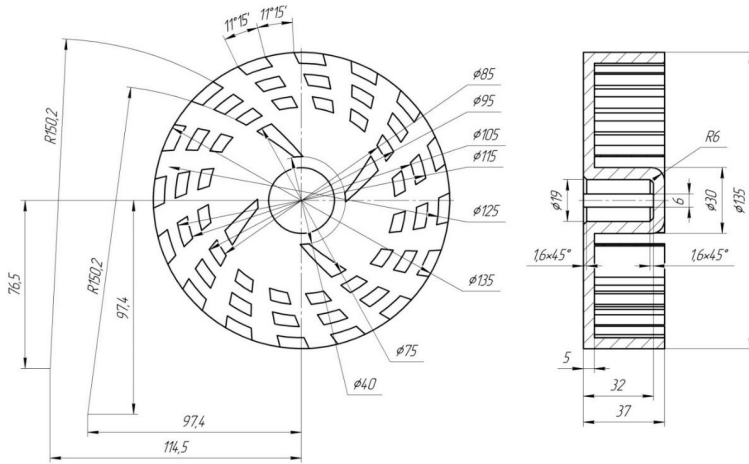


Рис. 3.46. Геометричні розміри ротора роторного кавітаційного диспергатор-гомогенізатора

рідини (VOF). Рух рідинної фази підпорядковується к-ε моделі турбулентності. Для визначення течії рідинної фази і наявності явища кавітації суміш представлялася як двофазне середовище рідина – газ, при цьому газом є газоподібна фаза рідини (пара). Прийнято, що рідинна фаза в процесі руху мала постійну щільність, а газ був реальним і підпорядковувався рівнянню Ван-дер-Ваальсу. Взаємодія між фазами рідина – газ підпорядковувалася моделі об’ємної рідини VOF-VOF і кавітації Schnerr-Sauer.

Для такого чисельного моделювання частота обертання ротора була прийнятою 1500 об/хв. При цьому період ітерацій складав 0,001 мс.

В початковий момент часу ділянка між статором і ротором була заповнена лише рідиною, тобто її вміст становив $\alpha_f = 1$. Температура в початковий момент часу становила 27 °С, тиск – 101,3 кПа. За вихідні дані прийнято, що рідина має постійну густину $\rho_f = 997,6$ кг/м³, динамічна в’язкість становила $\mu_f = 8,88 \cdot 10^{-4}$ Па·с, тиск насичення становив $p_f = 2338$ Па, молекулярна маса $M_f = 18$ кг/кмоль, коефіцієнт теплопровідності $\lambda_f = 0,62$ Вт/(м·К), питома теплоємність $C_f = 4181$ Дж/(кг·К). Своєю чергою газоподібна фаза рідини має динамічну в’язкість $\mu_g = 1,267 \cdot 10^{-5}$ Па·с, молекулярну масу $M_g = 18$ кг/кмоль, коефіцієнт теплопровідності $\lambda_g = 0,0253$ Вт/(м·К), питому теплоємність $C_g = 1938$ Дж/(кг·К).

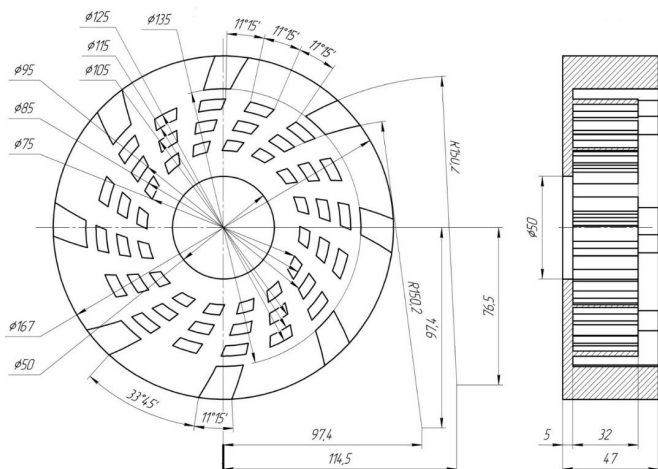


Рис. 3.47. Геометричні розміри статора роторного кавітаційного диспергатор-гомогенізатора

Сітка частини 3D моделі ділянки між робочими органами кавітаційного диспергатор-гомогенізатора в Star CCM наведена на рис. 3.48.

За фактори досліджень обрано частоту обертання ротора n , діаметр вхідного отвору D_{in} і кількість резонаторів N_{hole} . Межі та інтервали факторів досліджень наведені в табл. 3.6.

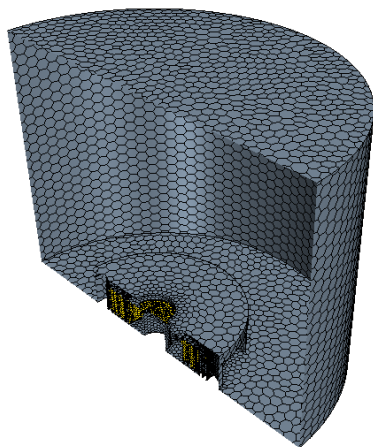


Рисунок 3.48 – Сітка частини 3D моделі області між робочими органами кавітаційного диспергатор-гомогенізатора в Star CCM+

Межі та інтервали факторів чисельного моделювання

Рівень	Частота обертання ротора n , об/хв. (x_1)	Діаметр вхідного отвору D_{in} , м (x_2)	Кількість резонаторів N_{hole} (x_3)
Верхній (+1)	3000	0,06	48
Середній (0)	2250	0,05	32
Нижній (-1)	1500	0,04	16
Інтервал	750	0,01	16

У процесі чисельного моделювання для кожного дослідів визначено:

- максимальну швидкість переміщення рідкої фази суміші у вхідному отворі $V_{in\ max}$;
- максимальну швидкість переміщення рідкої фази суміші в дифузори $V_{rot\ max}$;
- максимальний тиск рідкої фази суміші у вхідному отворі $P_{in\ max}$;
- максимальний тиск рідкої фази суміші в дифузори $P_{rot\ max}$;
- мінімальний тиск рідкої фази суміші в дифузори $P_{rot\ min}$.

Якісним критерієм оцінювання явища кавітації в розробленому обладнанні є максимальне й мінімальне число кавітації X_{max} і X_{min} , яке розраховується за формулами:

$$X_{max} = \frac{2(P_{rot\ max} - P_s)}{\rho V_{rot\ max}}, \quad (3.22)$$

$$X_{min} = \frac{2(P_{rot\ min} - P_s)}{\rho V_{rot\ min}}, \quad (3.23)$$

де P_{rot} – гідростатичний тиск набігаючого потоку в дифузори, Па;
 P_s – тиск насичених парів рідини при певній температурі навколишнього середовища, для водяного пару $P_s = 2314,4$ Па;
 ρ – щільність середовища, для води $\rho = 997$ кг/м³;
 V_{rot} – швидкість потоку в дифузори, м/с.

Відомо, що кавітація виникає при досягненні потоком граничної швидкості, коли тиск у потоці стає рівним тиску пароутворення

(насичених парів). Цієї швидкості відповідає граничне значення критерію кавітації.

Залежно від величини X можна розрізняти чотири види потоків:

- докавітаційний – суцільний (однофазний) потік при $X > 1$;
- кавітаційний – (двофазний) потік при $X \approx 1$;
- плівковий – зі стійким відділенням кавітаційної порожнини від решти суцільного потоку (плівкова кавітація) при $X < 1$;
- суперкавітаційний – при $X \ll 1$.

Критерієм продуктивності процесу диспергування є величина масового потоку суміші, яку будемо розраховувати за формулою:

$$Q = V_{in\ max} \rho S_{in} = V_{in\ max} \rho \pi D_{in}^2, \quad (3.24)$$

де S_{in} – площа вхідного отвору, m^2 .

Чим більше значення Q , тим більша маса суміші за одиницю часу піддається диспергуванню.

Раціональні конструктивно-режимні параметри кавітаційного диспергатор-гомогенізатора можна досягти за умови максимізації продуктивності процесу диспергування при мінімізації значення числа кавітації.

Моделювання проводилося шляхом почергового перебору всіх рівнів факторів із загальною кількістю $3^3 = 27$ дослідів.

Далі із застосуванням програмного пакета Mathematica визначалася модель регресії другого порядку для кожного із запропонованих критеріїв.

Результати чисельного моделювання кавітаційного диспергатор-гомогенізатора

За результатами чисельного моделювання отримано розподіл швидкостей переміщення рідкої фази суміші в робочій камері роторного кавітаційного диспергатор-гомогенізатора (рис. 3.49) [104–111]. Ця візуалізація свідчить про те, що рідка фаза переміщується по всьому об'єму робочої камери із середньою швидкістю 2,4 м/с. Тобто можна стверджувати, що вся суміш захоплюється ротором у наскрізному отворі статора і проходить крізь дифузори й резонатори, в яких відбувається процес диспергування.

На рис. 3.50 наведено розподіл і динаміка тиску в дифузори роторного кавітаційного диспергатор-гомогенізатора. Ця візуалізація свідчить про те, що середня різниця між максимальним і мінімальним

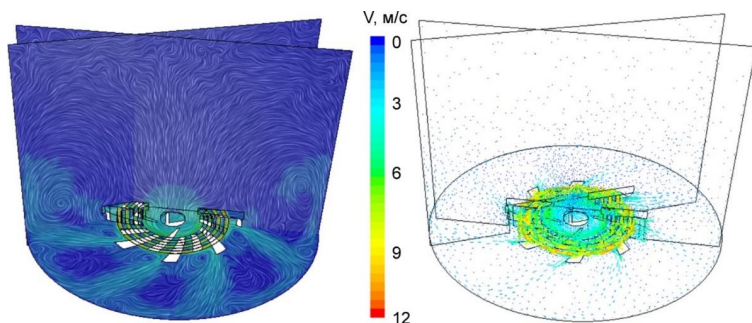


Рис. 3.49. Розподіл швидкостей переміщення рідкої фази суміші в робочій камері роторного кавітаційного диспергатор-гомогенізатора

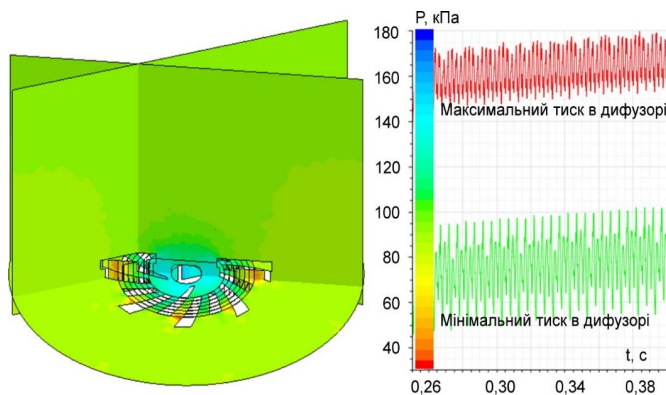


Рис. 3.50. Розподіл і динаміка тиску в дифузорі роторного кавітаційного диспергатор-гомогенізатора

значеннями тиску в дифузорі становить 90 кПа. Причому така зміна тиску відбувається за 0,004 с. Це дає змогу стверджувати про виникнення в дифузорі явища гідравлічного удару, що сприяє процесу диспергування.

На рис. 3.51 приведено розподіл і динаміка концентрації газоподібної фази рідини в дифузорі роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора. Максимальне значення концентрації газоподібної фази рідини в дифузорі коливається в діапазоні $3,6\text{--}4,7 \cdot 10^{-3}$. Це свідчить про постійну наявність у цій зоні бульбашок газоподібної фази рідини (пари), а коливання концентрації дозволяє стверджувати про їх постійне утворення і знищення, що якраз і визначає наявність явища кавітації.

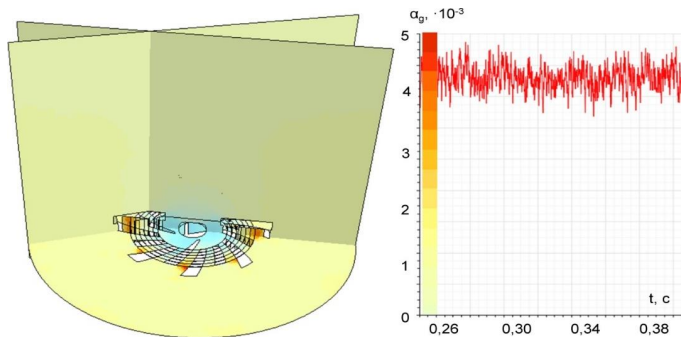


Рис. 3.51. Розподіл і динаміка концентрації газоподібної фази рідини в дифузорі роторного кавітаційного диспергатор-гомогенізатора

У результаті чисельного моделювання і подальшої обробки отриманих даних у програмному пакеті Mathematica отримано залежність зміни значення максимальної швидкості переміщення рідкої фази суміші у вхідному отворі від факторів досліджень у розкодованому вигляді:

$$V_{in\ max} = -0,665 + 15,1667 D_{in} + 1000 D_{in}^2 + 0,00133778 n - 0,0296354 N_{hole} - 0,171875 D_{in} N_{hole} + 0,000332031 N_{hole}^2. \quad (3.25)$$

Максимальна швидкість переміщення рідкої фази суміші у вхідному отворі $V_{in\ max} = 7,3$ м/с досягається при $n = 3000$ об/хв, $D_{in} = 0,06$ м, $N_{hole} = 16$. Фіксуєючи почергово фактори досліджень на зазначеному рівні, графічні інтерпретації залежності (3.25) побудовано на рис. 3.52.

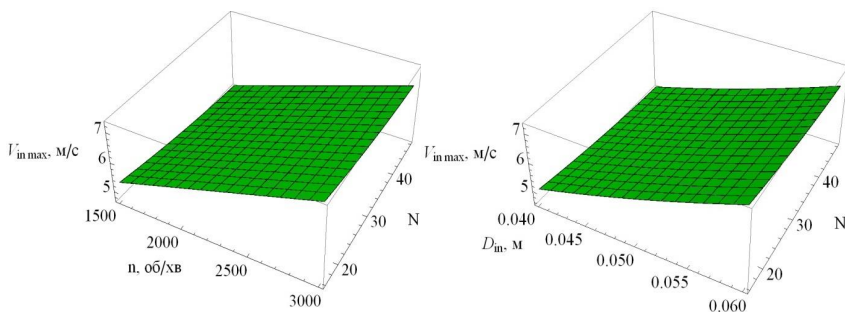


Рис. 3.52. Залежність максимальної швидкості переміщення рідкої фази суміші у вхідному отворі $V_{in\ max}$ від частоти обертання ротора n , діаметра вхідного отвору D_{in} і кількості резонаторів N_{hole}

У результаті чисельного моделювання й подальшої обробки отриманих даних у програмному пакеті Mathematica отримано залежність зміни значення максимальної швидкості переміщення рідкої фази суміші в дифузорі від факторів досліджень у розкодованому вигляді:

$$V_{\text{rot max}} = 0,845 + 17,8333 D_{\text{in}} + 0,00546222 n - 0,152292 N_{\text{hole}} + 0,0000925 n N_{\text{hole}} + 0,00140625 N_{\text{hole}}^2 \quad (3.26)$$

Максимальна швидкість переміщення рідкої фази суміші в дифузорі $V_{\text{rot max}} = 27,5$ м/с досягається при $n = 3000$ об/хв, $D_{\text{in}} = 0,06$ м, $N_{\text{hole}} = 48$. Фіксуючи по чергово фактори досліджень на зазначеному рівні, графічні інтерпретації залежності (3.26) побудовано на рис. 3.53.

У результаті чисельного моделювання й подальшої обробки отриманих даних у програмному пакеті Mathematica отримано залежність зміни значення максимального тиску рідкої фази суміші у вхідному отворі від факторів досліджень у розкодованому вигляді

$$P_{\text{in max}} = 50,7694 + 303,249 D_{\text{in}} + 0,0354123 n - 3,22069 \cdot 10^{-6} n^2 - 1,01458 N_{\text{hole}} + 7,61425 D_{\text{in}} N_{\text{hole}} + 0,0151657 N_{\text{hole}}^2. \quad (3.27)$$

Максимальний тиск рідкої фази суміші у вхідному отворі $P_{\text{in max}} = 154,4$ кПа досягається при $n = 3000$ об/хв, $D_{\text{in}} = 0,06$ м, $N_{\text{hole}} = 48$. Фіксуючи по чергово фактори досліджень на зазначеному рівні, графічні інтерпретації залежності (3.27) побудовано на рис. 3.54.

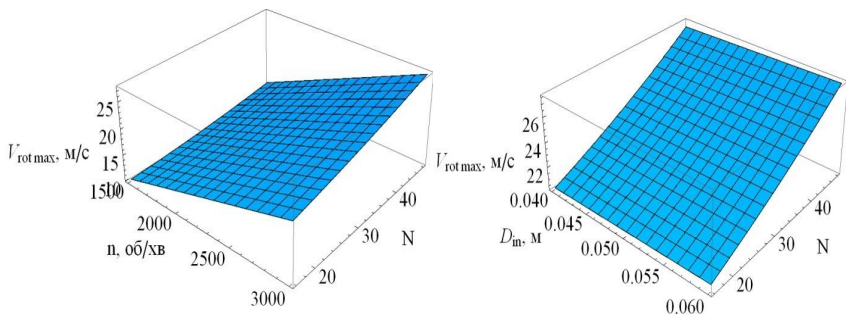


Рис. 3.53. Залежність максимальної швидкості переміщення рідкої фази суміші у дифузорі $V_{\text{rot max}}$ від частоти обертання ротора n , діаметра вхідного отвору D_{in} і кількості резонаторів N_{hole}

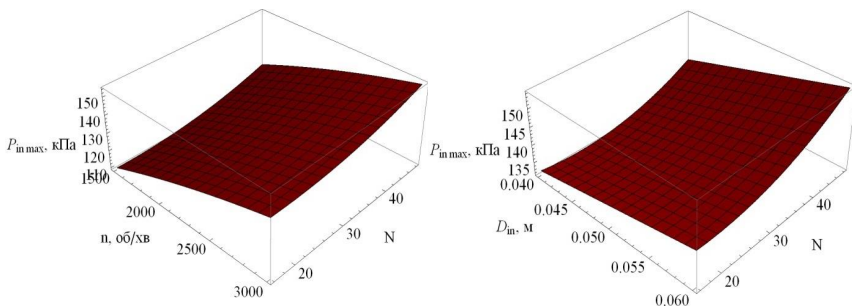


Рис. 3.54. Залежність максимального тиску рідкої фази суміші у вхідному отворі $P_{in\ max}$ від частоти обертання ротора n , діаметра вхідного отвору D_{in} і кількості резонаторів N_{hole}

У результаті чисельного моделювання й подальшої обробки отриманих даних у програмному пакеті Mathematica отримано залежність зміни значення максимального тиску переміщення рідкої фази суміші у дифузорі від факторів досліджень у розкодованому вигляді

$$P_{rot\ max} = 41,1716 + 711,412 D_{in} + 0,0570688 n - 6,94825 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,216568 N_{hole} - 9,78644 D_{in} N_{hole} + 0,0102735 N_{hole}^2. \quad (3.28)$$

Максимальний тиск рідкої фази суміші в дифузорі $P_{rot\ max} = 154,4$ кПа досягається при $n = 3000$ об/хв, $D_{in} = 0,06$ м, $N_{hole} = 48$. Фіксуючи по чергово фактори досліджень на зазначеному рівні, графічні інтерпретації залежності (3.28) побудовано на рис. 3.55.

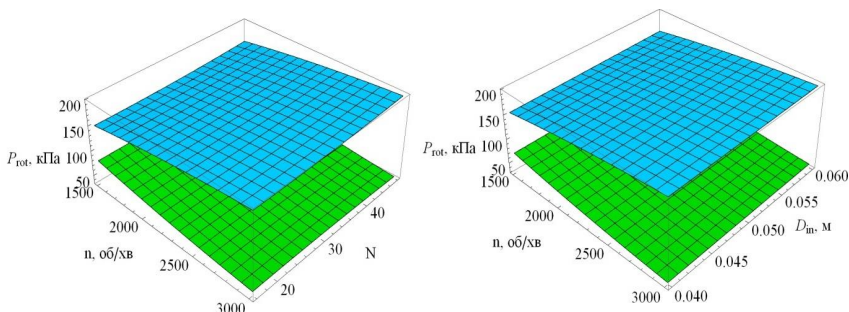


Рис. 3.55. Залежність максимального й мінімального тисків рідкої фази суміші в дифузорі $P_{in\ max}$, $P_{in\ min}$ від частоти обертання ротора n , діаметра вхідного отвору D_{in} і кількості резонаторів N_{hole}

У результаті чисельного моделювання й подальшої обробки отриманих даних у програмному пакеті Mathematica отримано залежність зміни значення мінімального тиску переміщення рідкої фази суміші у дифузорі від факторів досліджень у розкодованому вигляді

$$P_{\text{rot min}} = 133,276 + 209,7 D_{\text{in}} - 0,0570688 n + 6,94825 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,403501 N_{\text{hole}} - 0,00870244 N_{\text{hole}}^2. \quad (3.29)$$

Мінімальний тиск рідкої фази суміші в дифузорі $P_{\text{rot min}} = 37,2$ кПа досягається при $n = 3000$ об/хв, $D_{\text{in}} = 0,06$ м, $N_{\text{hole}} = 16$. Фіксуєючи почергово фактори досліджень на зазначеному рівні, графічні інтерпретації залежності (3.29) побудовано на рис. 3.55.

У результаті розрахунку максимального й мінімального чисел кавітації за формулами (3.22) і (3.23) отримані відповідні рівняння регресії:

$$X_{\text{max}} = 8,85738 - 0,0046054 n + 6,90585 \cdot 10^{-7} n^2 - 0,0626404 N_{\text{hole}} + 0,0000113792 n N_{\text{hole}} + 0,000297945 N_{\text{hole}}^2. \quad (3.30)$$

$$X_{\text{min}} = 6,00697 - 0,00363865 n + 5,73414 \cdot 10^{-7} n^2 - 0,0385963 N_{\text{hole}} + 0,0000106933 n N_{\text{hole}} + 0,0000802344 N_{\text{hole}}^2. \quad (3.31)$$

Мінімальне значення числа кавітації $X_{\text{min}} = 0,08$ $X_{\text{max}} = 0,57$ досягається при $n = 2725$ об/хв, $D_{\text{in}} = 0,049$ м, $N_{\text{hole}} = 48$. Фіксуєючи почергово фактори досліджень на зазначеному рівні, графічні інтерпретації залежностей (3.31), (3.32) побудовано на рис. 3.56.

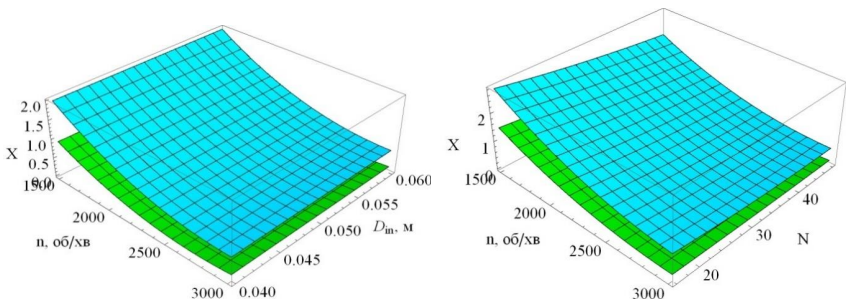


Рис. 3.56. Залежність максимального й мінімального чисел кавітації X_{min} , X_{max} від частоти обертання ротора n , діаметра вхідного отвору D_{in} і кількості резонаторів N_{hole}

3.3.5. Методика розрахунку параметрів кавітаційного диспергатор-гомогенізатора

Для кавітаційної обробки кормосуміші найважливішими параметрами є: робочий тиск (p_o , кПа); тиск, що розвивається ротором (p_p , кПа), який визначається кутовою швидкістю (ω , c^{-1}), зовнішнім радіусом (R_2 , м) і початковим радіусом установки лопаток (R_1 , м); довжина каналу ротора (l_p , м) і статора (l_c , м); кут нахилу бічних стінок каналу статора (β , °). На ефективність подрібнення більшою мірою впливають такі параметри: ширина каналу статора (a_c , м), окружна швидкість ротора (v_p , м/с), зазор між ротором і статором (δ , м).

Глибина каналу статора (h_c , м), кількість каналів ротора (z_p) і статора (z_c) впливають на подачу диспергатора й визначаються відповідно до необхідної продуктивності установки.

Для забезпечення оптимального режиму кавітації й механічної обробки кормової суміші з гарантованою якістю одержуваного продукту необхідно мати можливість визначати оптимальні значення вищевказаних параметрів залежно від продуктивності лінії диспергування, а також фізико-механічних властивостей зернової сировини й кінцевого продукту. У результаті розв'язання поставленої задачі була розроблена методика й алгоритм розрахунку параметрів диспергатора (рис. 3.57).

На першому етапі розрахунку визначають значення параметрів, що впливають на інтенсивність кавітаційної обробки кормосуміші: робочий тиск (p_o , кПа), кутову швидкість (ω , c^{-1}), зовнішній (R_2 , м) і внутрішній (R_1 , м) радіуси ротора, довжину каналів статора (l_c , м) і кут нахилу до бічних стінок (β , °). Оптимальні значення параметрів p_o , l_c і β були отримані в результаті чисельного моделювання.

Встановлено, що максимальна інтенсивність кавітації досягається при мінімальних значеннях l_p , у зв'язку з чим при розрахунку диспергатора доцільно прийняти мінімально можливе значення довжини каналу ротора, що обмежується його міцністю. Параметри R_1 , R_2 і ω впливають на величину тиску p_p , створюваного ротором, який, своєю чергою, утворює перепад тисків $\Delta p = p_p - p_o$ між порожниною ротора і відведенням диспергатора. Беручи до уваги результати попередніх досліджень, оптимальні значення p_p становитимуть 250–270 кПа. З іншого боку, значення p_p може бути отримано за формулою Ейлера для робочого колеса відцентрового насоса, після перетворення якої можливо визначити взаємопов'язані параметри R_1 , R_2 і ω :

$$R_2 = \sqrt{\frac{2(p_p - p_o)}{\rho \omega^2 \eta_r k_n}} + R_1^2, \text{ м}, \quad (3.32)$$

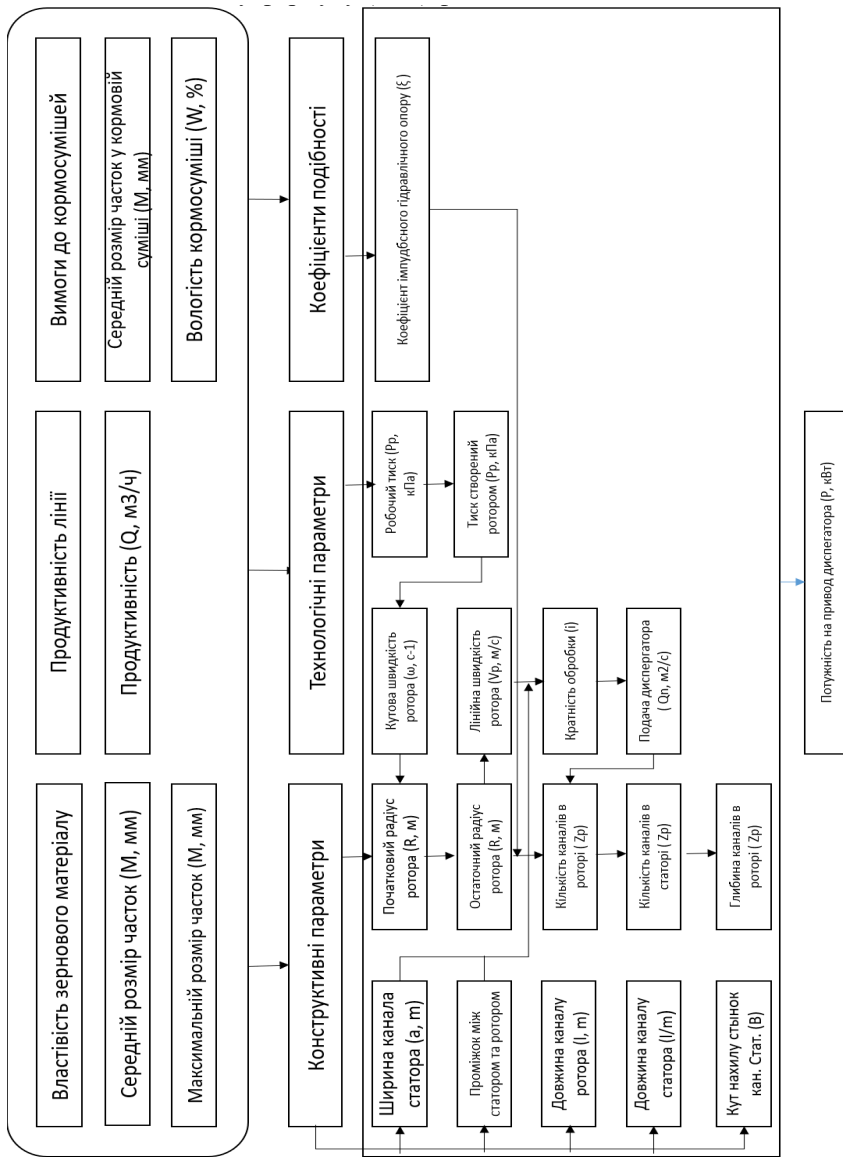


Рис. 3.57. Алгоритм розрахунку диспергатора

де p_n – статичний тиск у підводі диспергатора, Па;
 ρ – щільність кормо суміші, кг/м³;
 η_r – гідравлічний ККД, $\eta_r = 0,80-0,96$;
 k_d – коригувальний коефіцієнт, $k_d \approx 0,8$.

Величина статичного тиску в підводі варіюється в межах 80–110 кПа і залежить від вертикального розташування диспергатора відносно кормоприготувального бака.

Розрахункове значення щільності ρ в раціональних діапазонах варіювання вологості кормосуміші 65–75% і плющеного зерна 30–40% перебуває в межах 1060–1080 кг/м³.

З урахуванням вищезазначеного параметра R_2 може бути визначений шляхом підстановки у формулу (3.32) фіксованих значень R_1 .

Продуктивність лінії диспергування Q визначається співвідношенням:

$$Q = \frac{3600 \cdot Q_d}{i_d}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (3.33)$$

де Q_d – подача диспергатора, м³/с;
 i_d – кратність обробки кормової суміші.

Відповідно до формули (3.33) для забезпечення заданої продуктивності лінії диспергування подача диспергатора повинна дорівнювати:

$$Q_d = \frac{Q i_d}{3600}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.34)$$

Кратність обробки i_d приймається відповідно до динаміки зміни середньозваженого діаметра частинок кормосуміші. Теоретичні дослідження залежності від конструктивно-технологічних параметрів диспергатора описані в роботі [32], згідно з якими найбільший вплив на ефективність подрібнення частинок зерна в кормосуміші роблять такі фактори: ширина каналу статора a_c , окружна швидкість ротора v_p і зазор між ротором і статором δ .

Для підвищення ефективності подрібнення плющеного зерна ширину каналу статора a_c доцільно приймати найменшою, дотримуючись при цьому умови його незабивання частинками кормової суміші [90]:

$$a_c \geq 0,002m_0^{\max}, \text{ м}. \quad (3.35)$$

де m_0^{\max} – максимальний розмір часток у сировині, мм.

Наприклад, для диспергування плющеного зерна з $m_0^{\max} = 9$ мм значення $a_c = 0,018$ м.

Величина окружної швидкості v_p після вибору значень ω і R_2 визначається за формулою:

$$v_p = \omega R_2, \text{ м/с.} \quad (3.36)$$

Під час досліджень впливу величини зазору δ на якісні показники роботи диспергатора встановлено, що найбільша інтенсивність кавітації і краща якість подрібнення частинок зерна в кормосуміші досягаються при значеннях δ близьких до нуля. У зв'язку з цим при розрахунку диспергатора величина δ приймається мінімально можливою з огляду на точність виготовлення робочих органів і їх опор. Також слід враховувати, що при диспергуванні кормосуміші механічному руйнуванню підлягають тільки ті частинки, розміри яких більші ніж δ , оскільки в іншому разі вони проскочать у зазор між робочими органами без руйнування, тому недоцільно приймати значення δ більше за необхідний середньозважений діаметр частинок у кормосуміші, тобто більше за 0,001 м [31]. Для подальших розрахунків прийнято значення $\delta = 0,0008$ м.

Після визначення значень a_c , v_p і δ проводиться моделювання процесу подрібнення зернового матеріалу з початковим середньозваженим діаметром частинок M_0 , потім за графіком зміни M визначається необхідна кратність диспергування i_d .

З іншого боку, подача Q_d може бути визначена з теоретичної залежності [92]:

$$Q_d = \frac{(p_p - p_o) h_c a_c^3 z_p z_c}{2\pi R_2 \rho (l_c + l_p + \delta) (1 + \zeta_m) \zeta_{\text{імп}} v_p} + v_{\text{min}} h_c a_c z_c, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.37)$$

де p_o – робочий тиск, Па;

h_c – глибина каналу статора, м;

ρ – щільність кормосуміші, кг/м³;

ζ_m – коефіцієнт гідравлічного опору модулятора;

$\zeta_{\text{імп}}$ – коефіцієнт імпульсного гідравлічного опору;

v_{min} – швидкість руху рідини по перекритому каналу статора, м/с;

z_p, z_c – відповідно кількість каналів у роторі і статорі;

l_p, l_c – відповідно довжина каналу ротора і статора, м.

В залежність (3.37) входить три конструктивні параметри z_c , z_p і h_c :

$$(z_c h_c) = \frac{Q_d}{\frac{(p_p - p_o) a_c^3 z_p}{2\pi R_2 \rho (1_c + 1_p + \delta)(1 + \zeta_m) \zeta_{\text{имп}} v_p} + v_{\text{мін}} a_c}, \text{ м.} \quad (3.38)$$

Значення емпіричного коефіцієнта $\zeta_{\text{имп}}$, що входить до складу формули (3.38), були визначені в ході експериментальних досліджень, з результатів яких випливає, що $\zeta_{\text{имп}}$ перебуває в залежності від робочого тиску p_o і вологості оброблюваної кормосуміші W .

Виконавши підстановку значень $\zeta_{\text{имп}}$, ζ_m і $v_{\text{мін}}$ до формули (3.38), можна визначити параметр $(z_c h_c)$ при різних значеннях z_p . Наступним кроком є визначення глибини каналу статора за співвідношенням $h_c = \frac{(z_c h_c)}{z_c}$ шляхом підстановки значень z_c .

Потужність на привід подрібнювача-диспергатора може бути представлена у вигляді трьох складових елементів [93]:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{ізм}} + P_{\text{вн.тр}} + P_Q, \text{ кВт,} \quad (3.39)$$

де $P_{\text{ізм}}$ – потужність на подрібнення частинок зерна в кормосуміші, кВт;

$P_{\text{вн.тр}}$ – потужність на подолання сил в'язкого тертя в зазорі між ротором і статором, кВт;

P_Q – потужність на створення потоку кормосуміші, кВт.

Проведені дослідження складових елементів формули (3.39) показали, що значення $P_{\text{ізм}}$ визначаються фізико-механічними властивостями плющеного зерна і кормосуміші, на які, своєю чергою, впливають багато випадкових і неконтрольованих факторів: властивості зернової сировини для плющення (вологість, гранулометричний склад, біологічна стиглість, сорт зерна тощо); технологія плющення й консервування (режим роботи плющильного апарату, застосовуваний консервант); спосіб зберігання плющеного зерна. Таким чином, плющене зерно являє собою вкрай неоднорідне середовище, частинки якого, внаслідок випадкового впливу вищезазначених факторів, мають різні механічні дефекти і, як наслідок, міцність. Цей факт робить нераціональним визначення витрат енергії на подрібнення плющеного зерна з використанням існуючих теорій подрібнення [94].

Потужність на подолання сил в'язкого тертя в зазорі між ротором і статором $P_{\text{вн.тр}}$ може бути визначена за формулою для внутрішнього

тертя в паралельно-струменевому потоці рідини. До цієї формули входить динамічний коефіцієнт в'язкості, який при диспергуванні кормосуміші буде змінною величиною, оскільки в зазорі між ротором і статором міститься не тільки рідина, а й дрібні частинки зерна, концентрація яких в кормосуміші, а отже і в зазорі буде збільшуватися в міру руйнування більших частинок.

Підсумувавши вищезазначене, пропонуємо врахувати вплив невідомих $P_{\text{ізм}}$ і $P_{\text{вн.тр}}$ емпіричним коефіцієнтом $k_p = \frac{P_{\Sigma}}{P_Q}$, що характеризує відношення повної потужності P_{Σ} до потужності потоку P_Q , яка визначається за формулою [95]:

$$P_Q = p_o Q_d / 1000, \text{ кВт}, \quad (3.40)$$

де p_o – робочий тиск диспергатора, Па;

Q_d – подача диспергатора, м³/с.

Вищеописана методика й алгоритм розрахунку параметрів кавітаційного диспергатор-гомогенізатора реалізована в комп'ютерній моделі, що дозволяє значно спростити й автоматизувати роботу конструктора-машинобудівника при проектуванні подібних пристроїв.

3.3.6. Експериментальний зразок кавітаційного диспергатор-гомогенізатора

Кавітаційний диспергатор-гомогенізатор призначений для виробництва гомогенних, біологічно активних напіврідких кормосумішей (кормових добавок) підвищеної засвоюваності.

Конструкція кавітаційного диспергатор-гомогенізатора забезпечує якісне приготування напіврідкої кормосуміші з подрібненням та змішуванням кормових компонентів.

Розробка експериментального зразка кавітаційного диспергатор-гомогенізатора проведена на основі результатів попередніх теоретичних досліджень результатів чисельного моделювання процесів кавітаційно-диспергаційної обробки кормових компонентів у рідкому середовищі.

Експериментальний зразок кавітаційного диспергатор-гомогенізатора повинен виконувати такі технологічні операції:

- приймання компонентів кормосуміші;
- грубе (попереднє) подрібнення компонентів кормосуміші;
- тонке подрібнення (диспергацію) компонентів кормосуміші;

- підігрівання і знезаражування компонентів кормосуміші;
- вивантаження готового рідкого корму.

За наданими завданнями виготовлено конструкторську документацію на експериментальний зразок кавітаційного диспергатор-гомогенізатора. 3D модель експериментального зразка кавітаційного диспергатор-гомогенізатора наведена на рис. 3.58. Збирання ротора, статора і вала наведено на рис. 3.59.

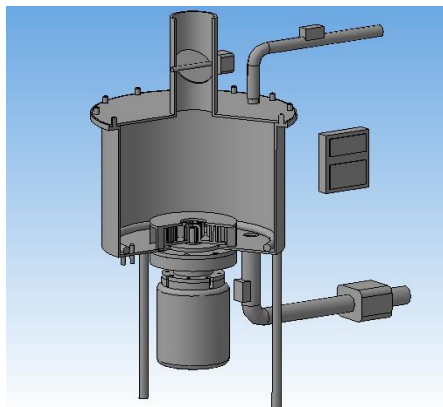


Рис. 3.58. 3D модель експериментального зразка кавітаційного диспергатор-гомогенізатора

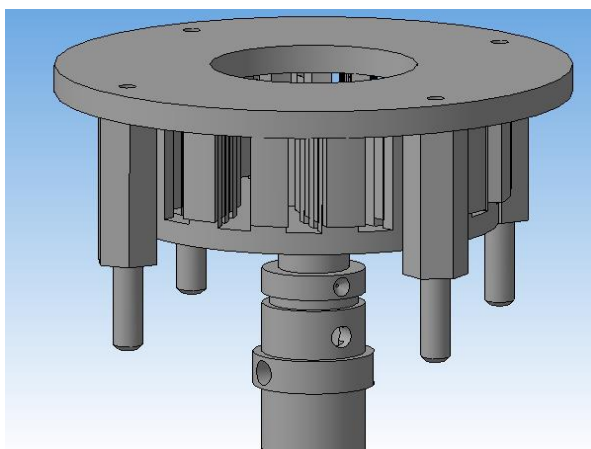


Рис. 3.59. 3D модель збирання ротора, статора і вала кавітаційного диспергатор-гомогенізатора

Для проведення випробувань виготовлено експериментальний зразок кавітаційного диспергатор-гомогенізатора. Процес виготовлення ротора і статора на фрезерному станку з числовим програмним керуванням наведений на рис. 3.60.

У зібраному вигляді експериментальний зразок кавітаційного диспергатор-гомогенізатора наведено на рис. 3.61.

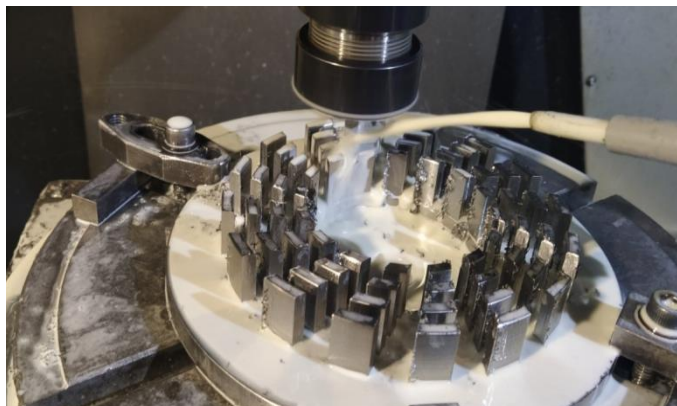


Рис. 3.60. Процес виготовлення ротора і статора експериментального зразка кавітаційного диспергатор-гомогенізатора на фрезерному станку з числовим програмним керуванням



Рис. 3.61. Загальний вигляд експериментального зразка кавітаційного диспергатор-гомогенізатора

3.4. Експандер для приготування харчових продуктів і кормів

Автори: Алієв Е. Б., Лінко М. О.

3.4.1. Аналіз техніко-технологічного оснащення процесів екструзійного та експандованого приготування харчових продуктів і кормів

Екструзійне та експоноване приготування набуває все більшої популярності у світовій агрохарчовій промисловості, особливо в харчовій і кормовій галузях. Зазначені технології використовують для виробництва так званих інженерних харчових продуктів і спеціальних кормів [112]. Узагальнюючи дослідження [113–115], ми з'ясували, що екструзія й експандування рослинної сировини зводиться до формування подрібненого матеріалу в баротермічних умовах. За допомогою енергії зсуву, яку надає обертовий гвинт, і додаткового нагрівання, харчовий матеріал нагрівається до температури плавлення або пластифікації [116]. У такому зміненому реологічному стані харчовий матеріал транспортується під високим тиском через матрицю або серію матриць, і продукт розширюється до своєї остаточної форми. Це виявляє відмінні фізичні та хімічні властивості екструдатів відмінні від властивостей сировини, що використовується.

Екструдери й експандери належать до сімейства HTST (високотемпературного короткочасного) обладнання, здатного виконувати завдання приготування харчових продуктів і кормів під високим тиском. Оскільки вплив високих температур триває лише короткий час, обмежується небажаний вплив денатурації білків, амінокислот, вітамінів, крохмалю й ферментів. Фізико-технологічні аспекти, такі як теплопередача, масообмін, передача імпульсу, час дії температури, мають сильний вплив на властивості харчових продуктів і кормів під час екструзійного й експандованого приготування та можуть суттєво вплинути на якість кінцевого продукту.

Тому аналіз і порівняння техніко-технологічного оснащення процесів екструзійного та експандованого приготування харчових продуктів і кормів має важливе значення при оптимізації конструктивно-технологічних параметрів відповідного обладнання.

Екструдери й експандери – це технологічний реактор [117], в якому створені передумови з наявністю певного гвинтового компонування, використання змішувальних елементів, величини відповідних зазорів, встановленої потужності двигуна та блоку нагрівання. Правильне використання цих факторів дозволяє стимулювати перетво-

рення оброблених матеріалів за рахунок процесу нагрівання, наприклад денатурації білків у присутності води та розкладання крохмалю, на який впливає комбінований вплив тепла, тертя та деформації. Ці реакції також можуть бути спричинені наявністю окремого біохімічного або хімічного компонента, наприклад, ферменту або агента, що контролює рівень pH [118].

У 1980-х роках на світовому ринку кормового обладнання з'явилось виробництво промислових експандерів. Ідея їх роботи заснована на гвинтовому екструдері, де оброблений матеріал надалі піддається перемішуванню та термічній обробці. Сфера застосування цих пристроїв з кожним роком збільшується. Спочатку їх використовували для попередньої обробки перед гранулюванням корму, а зараз експандери використовуються в автономних процесах: для підвищення поживної цінності повножирних соєвих бобів та інших бобових, для стерилізації компонентів корму, а в деяких випадках для виробництва простих комбікормів [119, 120].

Варто зазначити, що існує багато подібностей між процесами, що відбуваються в експандері та в екструдері, оскільки їх сутність полягає в баротермічній обробці. Істотна відмінність екструдування від експандування полягає в тому, що останній є менш енергоємним і що на виході з установки матриця замінюється на конічний випускний клапан (найпопулярніше рішення). Процес експандування може бути застосований безпосередньо до харчового продукту або окремого інгредієнта, а іноді навіть використовується як частина складнішої системи, в якій сировина розширюється після приготування.

На відміну від одnogвинтових харчових екструдерів, експандери мають просту конструкцію та легше керування режимними параметрами. Певне значення має економічний фактор від їх застосування. Наприклад, якщо використовується експандер, виробничі витрати становлять 30 % виробничих витрат двогвинтового екструдера для харчових продуктів і близько 50 % виробничих витрат одnogвинтового екструдера. Звичайно, експандери можуть використовуватися лише для обмежених цілей, тому не завжди застосовні.

Табл. 3.7 показує основні переваги застосування експандерів порівняно з екструдерами одно- і двогвинтового виконання.

Основними компонентами експандерів є блоки подачі й попередньої обробки, корпус із клапанами для впорскування пари, гідравлічна система на матриці, яка регулює рівень тиску, і гвинт, що приводиться в рух від двигуна. Сам експандер є спеціально розробленим одnogвинтовим технічним засобом із діаметром від 150 до 500 мм (рис. 3.62), який може працювати з продуктивністю до

Таблиця 3.7

**Результати порівняння екструдерів та екструдерів
для виробництва кормів**

Фактор	Одногвинтовий екструдер	Двогвинтовий екструдер	Експандер
Питома енергоємність процесу (кВт·год/т)	30–70	40–80	12–30
Тиск (МПа)	1–8	1–10	1–6
Температура процесу (°С)	90–160	90–180	80–140
Вологість вхідного матеріалу (%)	18–28	18–60	12–30
Ступінь клейстеризації крохмалю (%)	80–100	90–100	40–80
Розчинність білка (%)	нижче ніж 10	нижче ніж 10	10–12
Агломераційна здатність	так	так	немає
Ефект змішування	середній	хороший	поганий
Залежність від вмісту компонентів у матеріал	середня	незалежний	висока
Наявність додаткового нагрівання	так	так	так/ні
Наявність додаткового охолодження	так/ні	так	ні
Самоочищення	ні/погано	добре	ні
Інвестиційні витрати	середні	високі	низькі
Витрати на технічне обслуговування	середні	високі	низькі

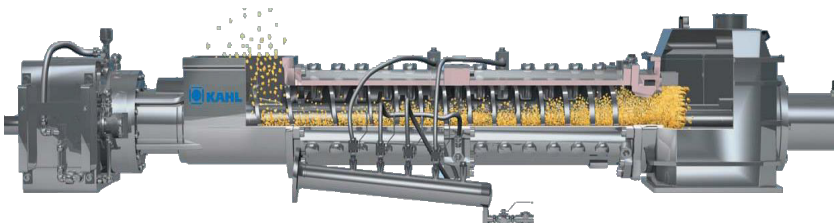


Рис. 3.62. Загальний вигляд експандера виробництва A. Kahl GmbH

30 т/год. Вони оснащені різними головками: конічними кільцеподібними (із кільцевими зазорами), пальцеподібними, фланцевими або дископодібними, а також відносно простою системою пластифікації.

Тип матриці значною мірою визначає якість продукції та хід обробки (рис. 3.63). Для споживача особливо важлива здатність до



Рис. 3.63. Загальний вигляд експандатів

агломерації, що дозволяє формувати продукт, клейстеризація крохмалю, термічна обробка й можливість підтримувати подальший виробничий процес.

Найпоширенішою конструкцією матриці експандерів є кільцевий зазор кільцевої форми, проста конструкція з простим обслуговуванням [121]. Ці особливості у поєднанні з помірним рівнем інвестиційних витрат, роблять його широко визнаним рішенням. Простота конструкції також тягне за собою недоліки, пов'язані з нелінійним вихідним потоком матеріалу, його нерівномірною формою і розмірами експандату. Бувають також випадки, коли прорізи головки матриці забиваються великими сегментами продукту. У результаті пристрій демонструє пульсації та коливання температури продукту, часто близько 20 °С. Низька гнучкість процесу та низька схильність до агломерації змушують виробника корму встановлювати додаткові допоміжні пристрої вздовж технологічної лінії.

Подібні характеристики має і фланцева матриця, проте її використання спричиняє більший вплив на форму експандату. Цей тип можна порівняти з матрицями, які використовуються в екструдерах.

Як уже зазначалося, основна робота з розробки експандерів зосереджена на вдосконаленні контролю баротермічної обробки, збільшенні здатності формувати експандати, підвищенні їх гомогенізаційної якості та зменшенні енерговитрат. Це знайшло відображення в останніх конструктивних рішеннях для матриць експандерів. Хорошим прикладом є матриця пальчикового типу з лінійним витіканням продукту.

Під час вибору типу експандера важливо вирішити питання, для яких цілей він потрібен і який корм буде виробляти. Відповідь на ці запитання визначить правильний вибір й понесені інвестиційні витрати.

Розглянемо більш детально процес експандування кормів. Спочатку матеріал подрібнюється, попередньо обробляється й зволожується. Потім матеріал рухається вздовж корпусу експандера, де він під тиском потрапляє всередину опорного блоку, за рахунок тертя

й додавання гарячої пари виникає підвищення температури. Коли продукт виходить з матриці установки, він розширюється в результаті швидкого випаровування води та різкого зниження тиску. Час перебування всередині експандера становить 5–10 с при температурі 100–125 °С. При виході з матриці температура швидко зменшується до 90 °С. Після завершення цього процесу суміш поміщають у горизонтальну сушарку-охолоджувач на 10 хв, протягом яких температуру знижують до 20–24 °С відповідно до температури навколишнього середовища.

Використання експандерів на лінії переробки кормових гранул має багато переваг, найважливішими з яких є:

- покращення поживності корму (краща конверсія корму);
- більш ефективне використання сировини низької якості або навіть відходів;
- – стерилізація бактеріологічно заражених матеріалів;
- – кращий контроль подачі рідких добавок;
- – зниження енергоспоживання пелетного преса;
- – підвищення продуктивності пелетного преса;
- – розширення асортименту продукції;
- – можливість використання волокнистих матеріалів;
- – зниження викидів пилу та втрат під час гранулювання.

Недоліком вищезгаданого рішення є подвійні витрати пари та більші витрати енергії порівняно із застосуванням простого гранулювання.

Застосування експандерів, як автономного пристрою може дати такі результати:

- – більша модифікація крохмалистих інгредієнтів;
- – знижені антихарчові фактори в продукті;
- – можлива агломерація продукту;
- – підвищення харчової цінності переробленої сировини.

На рис. 3.64 показано можливі варіанти застосування експандерів.

Використання експандату економічно виправдане завдяки покращенню практичних характеристик компонентів матеріалу, що застосовуються в широкому асортименті кормів. Для цього необхідно встановити відповідні параметри технологічного процесу, що залежать від типу використовуваних матеріалів і застосування корму.

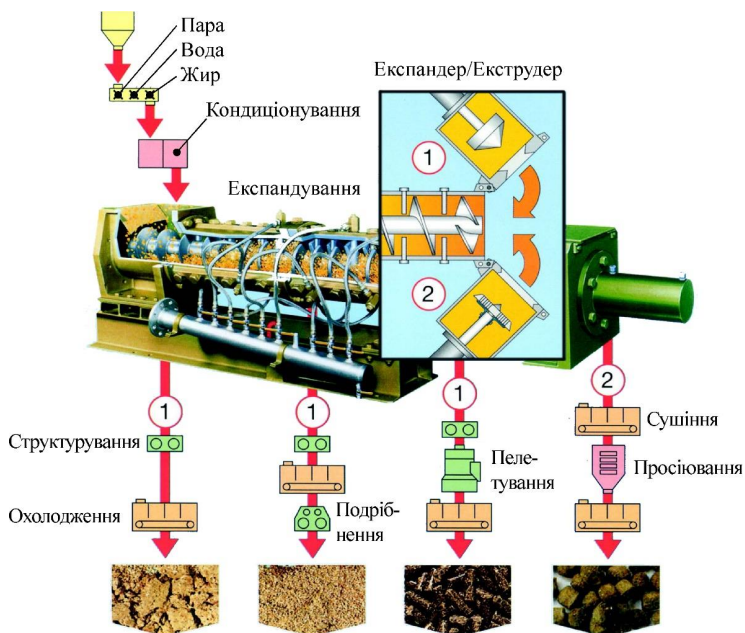


Рис. 3.64. Застосування експандера в різних технологічних лініях виробництва A. Kahl GmbH

У літературі можна знайти результати великої кількості експериментів щодо впливу експандування на фізико-хімічні властивості переробленої рослинної сировини. Багато експериментів з годівлі проведено для того, щоб перевірити, наскільки використання експандованого корму було економічно виправданим й ефективним з точки зору поживності. Більшість досліджень показало позитивні ефекти, включаючи економічні аспекти: покращення гігієнічності та засвоюваності кормів [122, 123]. Щоб підтвердити переваги цієї технології, у табл. 3.8 наведено результати випробувань годівлі птиці, яку годували гранулами корму, пресованими приблизно при 80 °С, та експандатом, обробленим при 115 °С.

Можна отримати якісні соєві боби, оброблені тільки експандером. У дослідженнях [124] перевірили продуктивність курчат-бройлерів, раціон яких складався із соєвої олії та соєвого шроту, порівняно з продуктивністю бройлерів, в раціоні яких було 20% експандованих бобів. Кінцевий продукт мав рівень розчинності білка КОН 91,2%, уреазну активність 0,06 і вміст інгібітора трипсину

Таблиця 3.8

**Результати випробувань експандованих кормів на птиці
(3 групи по 50 бройлерів)**

Вік, дні	Експандати (115 °С)		Пелети (80 °С)	
	Вага (г)	Коефіцієнт конверсії корму	Вага (г)	Коефіцієнт конверсії корму
20	596 ±19	1,40 ±0.02	587 ±18	1,36 ±0.02
37	1620 ±26	1,81 ±0.02	1586 ±25	1,73 ±0.02
42	1902 ±32	1,93 ±0.02	1866 ±30	1,81 ±0.02

3,6 мг/г, тоді як значення для 48 % соєвого шроту, використаного як контрольний зразок, становили 85,5%, 0,19 одиниці й 2,5 мг/г відповідно. Кури, яких годували квасолею, важили 2621 г і мали індекс конверсії 1,988 на 2617 г, тоді як індекс конверсії контрольної групи курей становив 1,938 ($P > 0,05$).

Згідно з дослідженням [125] встановлено зменшення патогенних організмів у кормах після гідротермічної обробки експандерами. Так загальна кількість мікроорганізмів для необробленого корма становила 12 млн КУО/мл, а для оброблених експандатів – 30 тис. КУО/мл.

Використання винятково експандерів вимагає дуже високого рівня точності, щоб забезпечити правильну та рівномірну обробку бобів. По-перше, вони повинні бути рівномірно подрібнені. Тому доцільно замість молоткового млина використовувати циліндровий млин. По-друге, квасоля потребує попереднього кондиціонування при 100 °С протягом 10 хв. По-третє, температуру близько 130 °С необхідно застосовувати протягом 20 с. Температура 130 °С протягом тривалого часу погіршить якість білка, перш за все лізину. Дані, отримані в ході детальних досліджень, показали, що правильний вибір часу й температури під час експандування має велике значення. Для керування режимними параметрами потрібні спеціальне обладнання й результати експериментальних досліджень.

Останніми роками експандери набувають популярності завдяки використанню їх для збагачення ріпакової макухи – побічного продукту процесу виробництва біокомпонентів палива. Під час бурхливого розвитку біопалива його виробники зіткнулися з проблемою ефективного використання величезної кількості побічних продуктів, таких як згаданий ріпак. Їх можуть використовувати фермери для годівлі тварин за однієї умови – належного збагачення. У цьому випадку одним із найбільш економічно вигідних рішень є баротермічна обробка, особливо з використанням експандерів.

Варто зазначити, що експандери також можуть використовуватися, хоч і обмежено, для виробництва кормів, які раніше вироблялися тільки шляхом екструзії. Маються на увазі корми для домашніх тварин та аквакорми, які вимагають належної обробки суміші й остаточного формування в матриці. Через специфічні фізичні вимоги (адекватне поглинання та стабільність у водному середовищі) цей тип корму виробляють переважно на екструдерах. Однак останнім часом виробники експандерів почали використовувати їх для виконання цієї роботи. Причина в тому, що експандери можна використовувати тільки для простих форм виробів нескладної рецептури й форми. Як правило, застосовується експандер-гранулятор, який у кінцевому підсумку надає корму відповідні фізичні властивості. Гранули, завдяки властивості швидкого поглинання, використовуються в основному для годівлі тих видів риб, які збирають корм з дна водойми. Подальшим кроком у цій галузі є використання експандерів зі змінною матрицею, яка після встановлення працює як простий одногвинтовий екструдер.

Економічні та харчові аспекти використання експандерів роблять їх використання зрозумілим і виправданим у кормовій галузі. Застосування комплекту експандер-гранулятор підвищує собівартість виробництва на 10–15% порівняно з одним лише гранулюванням. Проте загальний рахунок прибутків і витрат є позитивним завдяки якісним результатам, які врівноважують понесені витрати.

Застосування експандерів у світовій комбікормовій промисловості з кожним роком зростає, що також відображається в ширшому асортименті нещодавно вироблених кормів для тварин. Переваги цієї техніки починають цінувати й у нерозвинених країнах. Корисність експандера повністю підтверджується виробниками кормів, які вже впровадили вищезгадані методи виробництва.

3.4.2. Фізико-математичний апарат чисельного моделювання експандера кормів

Геометрія гвинта експандера має великий вплив на пропускну здатність лінії приготування експандованих кормів, а також на їх якість, отже, є вирішальною для техніко-економічної ефективності [112]. Щоб заощадити питомі енерговитрати, існують різні методи аналітичного розрахунку, які враховують механізми руху і руйнування твердих речовин, тому не потрібно проводити тривалі експерименти методом проб і помилок. Існує багато припущень і спрощень, які необхідно зробити, щоб отримати аналітичне рішення; наприклад, припущення, що компоненти кормів утворюють твердий шар, який

тече з рівномірною швидкістю [126]. Моделювання з використанням методу дискретних елементів (DEM) набуває все більшого поширення для опису твердих тіл, що рухаються в грануляторах, екструдерах або експандерах, оскільки тут можливі відносні переміщення між частинками за визначенням [127–129]. Так, імітаційна модель DEM використовується для віртуального проєктування експериментів і дає змогу отримати велику базу даних для оцінювання ефективності технологічного процесу.

Для кращого розуміння та обговорення представленої проблеми наведено деякий аналіз теоретичних передумов руху твердих речовин в одношнекових грануляторах, екструдерах та експандерах.

Багато підходів до опису руху твердих речовин в одногвинтовому грануляторі, екструдері або експандері, які стали відомі дотепер, зводяться до концепції моделі Дарнелла і Мола [130]. У цій моделі зроблено припущення, що гранули поводяться як подібний до твердого тіла блок, який протікає через гвинтовий канал як твердий шар у потоці блоків. На цей твердий шар діють різні сили тиску та тертя, які дозволяють розрахувати напрямок руху на основі балансу сил і моментів. З того часу моделювання, особливо сил, було детально обговорено та адаптовано в багатьох наукових дослідженнях.

Описана вище аналітична модель для опису руху твердих тіл на основі фізико-математичних міркувань не використовувалась на початку 2000-х років, оскільки з'явилося чисельне моделювання на основі методу дискретних елементів (DEM). Це стало можливим насамперед завдяки підвищенню продуктивності персонального комп'ютера. DEM, розроблений Кандааллом і Страком [131], був спочатку розроблений для моделювання молекулярної динаміки і з того часу широко застосовується в технологічних процесах, машинобудуванні та геотехніці.

Основною перевагою моделювання DEM є те, що необхідно робити менше попередніх припущень щодо поведінки частинок сипкого матеріалу. Основою DEM є зображення частинок у вигляді сфер або частинок, що складаються з кількох сфер. Для обчислення взаємодії цих частинок з іншими частинками або геометрією вони не з'єднуються, а використовується віртуальне перекриття. Залежно від цього перекриття та граничних умов контактні моделі розраховують контактні сили в нормальному та тангенціальному напрямках. Потім ці сили використовуються для вирішення рівнянь збереження імпульсу та обчислення нових величин руху. Коли ці величини руху інтегруються на етапі моделювання, виникають нові положення час-

тинок, і, таким чином, виникають нові віртуальні перекриття, цикл обчислень починається знову [132, 133].

Завдяки хорошій придатності DEM для опису руху твердих речовин у грануляторах, екструдерах або експандерах, цей метод використовується для оцінювання існуючих підходів аналітичного розрахунку. Основним слабким місцем аналітичних моделей є те, що вони ніколи не відхиляються від припущення про блоковий потік. Більше того, з цієї причини розрахунок конструктивно-технологічних параметрів гвинта складної конструкції може бути неточним.

Аналіз руху твердих компонентів корму у гвинтовому каналі експандера базується на динаміці переміщення систем твердих частин методом дискретних елементів (DEM). Тверді кормові компоненти, як дискретні елементи подаються у гвинтовий канал через бункер. Потік у бункері зазвичай здійснюється самопливом, хоча за певних обставинах необхідно створювати додаткове зусилля. В цих дослідженнях це питання не розглядатиметься. Після того як компоненти корму потрапляють у гвинтовий канал експандера, вони починають переміщуватися вздовж горизонтальної лінії по спіралі. Через зменшення геометричних розмірів гвинтового каналу компоненти корму ущільнюються, утворюючи твердий шар або конгломерат, який потім транспортується до формуючої насадки.

Для розгляду фізико-математичного апарату руху твердих компонентів корму у гвинтовому каналі експандера складено відповідну розрахункову схему (рис. 3.65). На рис. 3.65 наведені такі геометричні параметри експандера: діаметр циліндра D_b , діаметр вала гвинта D_s , глибина каналу гвинта h , крок гвинта t , зазор між гвинтом і циліндром δ , ширина каналу гвинта b , кут спіралі гвинта ϕ і ширина навивки гвинта e . Як зазначалось вище по довжині гвинта експандера його геометричні параметри змінюються. Згідно з дослідженнями [134–136] для забезпечення квадратичного (або, як окремий випадок, лінійного) характеру зміни параметрів гвинта, а саме площі перерізу каналу гвинта, площі та об'єму каналу за довжиною гвинта, достатньо забезпечити лінійну зміну двох геометричних параметрів гвинта, а саме – ширини каналу гвинта (кроку гвинта) та його глибини, тобто

$$t = t_0 + k_b dl, \quad (3.41)$$

$$h = h_0 + k_h dl, \quad (3.42)$$

де t_0 – початковий крок гвинта, м;

h_0 – початкова глибина каналу гвинта, м;

- k_t – коефіцієнт зміни кроку гвинта за його довжиною;
- k_h – коефіцієнт зміни глибини каналу гвинта за його довжиною;
- dl – мінімальний крок за довжиною каналу гвинта, м.

Розглянемо всі сили, що діють на конгломерат компонентів корму під час його транспортування й ущільнення (рис. 3.65). Ці сили розглядаються в макрорівні (без урахування DEM) за припущенням, що конгломерат компонентів корму є суцільним і однорідним. Так на конгломерат компонентів корму діють такі сили:

- – сили нормальної реакції між конгломератом компонентів корму й боковими стінками гвинта F_{N1} , F_{N2} ;
- – сили тертя між конгломератом компонентів корму й боковими стінками гвинта експандера F_{f1} , F_{f2} ;
- – сила тертя між конгломератом компонентів корму і гвинтом F_{D1} ;
- – сила тертя між конгломератом компонентів корму і циліндром F_{D2} ;
- – нормальна сила від тиску F_{p1} , F_{p2} .

У зазначених дослідженнях вирішено диференціальне рівняння рівноваги елемента конгломерату компонентів корму й отримано залежність зміни тиску по довжині їх переміщення вздовж каналу експандера. Отримана В. В. Братішком залежність тиску, що створюється на елемент конгломерату компонентів корму не враховує його структури. Розглянувши конгломерат компонентів корму як щільну упаковку сферичних частинок DEM (рис. 3.66), стверджуємо, що сила

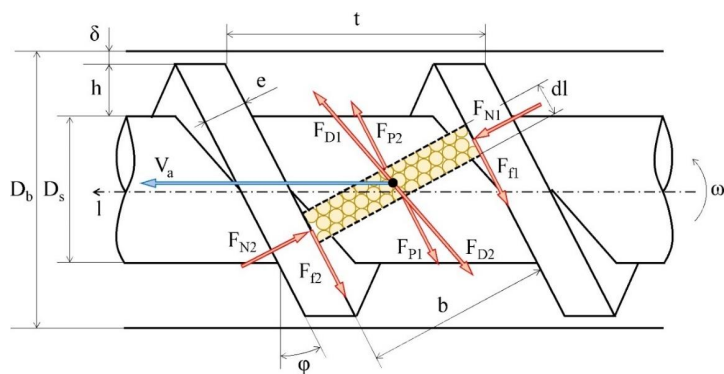


Рис. 3.65. Розрахункова схема руху твердих компонентів корму у гвинтовому каналі експандера

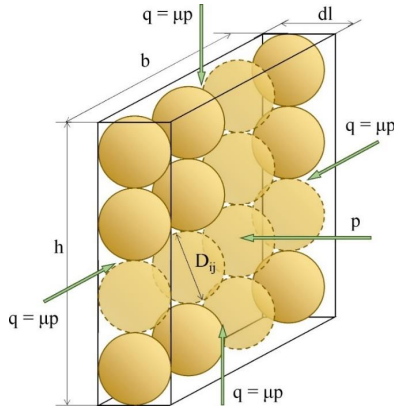


Рис. 3.66. Щільна упаковка сферичних частинок твердих компонентів корму у гвинтовому каналі експандера

тиску повинна компенсуватися сумарною силою контактної взаємодії насінин між собою і стінкою.

Сила тиску F_p розраховується з геометричних параметрів шнека та кількості частинок N у силісому полі в елементарному об'ємі елемента конгломерату компонентів корму:

$$F_p = \frac{q\pi(D_b^2 - D_s^2)}{4N}. \quad (3.43)$$

Кількість частинок N в елементарному об'ємі елемента конгломерату компонентів можна розрахувати так:

$$N = N_b N_h = \left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor \left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor, \quad (3.44)$$

де N_b – кількість частинок вздовж ширини каналу;

N_h – кількість частинок вздовж глибини каналу;

D_{ij} – діаметр частинки ij ;

$\langle \rangle$ – функція середнього значення;

$\lfloor \rfloor$ – функція визначення найбільшого цілого, що менше або дорівнює числу під дужками;

Для визначення сили контактної взаємодії компонентів корму між собою складемо відповідну розрахункову схему (рис. 3.67).

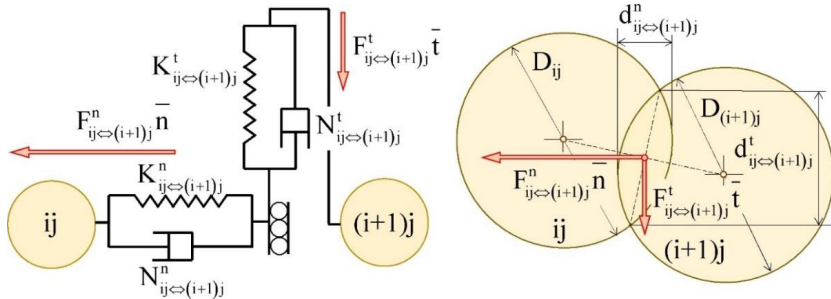


Рис. 3.67. Розрахункова схема сил контактної взаємодії компонентів корму між собою

Згідно з пружино-демпферною контактною моделлю Герца-Міндліна [137] сумарна сила контактної взаємодії компонентів корму між собою визначається так:

$$\bar{F}_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^c = F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n \bar{n} + F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^t \bar{t}, \quad (3.45)$$

- де $\bar{F}_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^c$ – сила взаємодії між частинками ij та $(i+1)j$, Н;
 $F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n$ – нормальний складник сили між частинками ij та $(i+1)j$, Н;
 $F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^t$ – тангенціальний складник сили між частинками ij та $(i+1)j$, Н;
 \bar{n} , \bar{t} – одиничні вектори нормального й тангенціального напрямів відповідно.

Нормальний складник сили визначається таким рівнянням:

$$F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n = -K_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n d_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n - N_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n V_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n, \quad (3.46)$$

- де $K_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n$ – нормальний коефіцієнт жорсткості пружної складової, кг/с²;

$$K_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n = \frac{4}{3} E_{ij \leftrightarrow (i+1)j} \sqrt{d_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n R_{ij \leftrightarrow (i+1)j}}; \quad (3.47)$$

- $N_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n$ – нормальний коефіцієнт згасання демпферного складника, кг/с;

$$N_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n = \sqrt{(5K_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n M_{ij \leftrightarrow (i+1)j})} N_{n \text{ damp}}. \quad (3.48)$$

Згідно з дослідженням [137] тангенціальний складник сили визначається, як

$$F_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^t = -K_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^t d_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^t - N_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^t V_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^t, \quad (3.49)$$

якщо $\left| K_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^t d_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^t \right| < \left| K_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^n d_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^n \right| C_{fs}$, де C_{fs} – статистичний коефіцієнт тертя між частинками компонентів корму. В іншому випадку тангенціальний складник сили визначається таким рівнянням:

$$F_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^t = \frac{\left| K_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^n d_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^n \right| C_{fs} d_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^t}{\left| d_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^t \right|}, \quad (3.50)$$

де $K_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^t$ – тангенціальний коефіцієнт жорсткості пружного складника, кг/с²:

$$K_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^t = 8G_{ij \Leftrightarrow (i+1)j} \sqrt{d_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^t R_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}}; \quad (3.51)$$

$N_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^t$ – тангенціальний коефіцієнт згасання демпферного складника, кг/с:

$$N_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^t = \sqrt{(5K_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^t M_{ij \Leftrightarrow (i+1)j})} N_{t \text{ damp}}; \quad (3.52)$$

$N_{n \text{ damp}}$, $N_{t \text{ damp}}$ – нормальний і тангенціальний коефіцієнти загасання відповідно

$$N_{n \text{ damp}} = -\ln(C_{n \text{ rest}}) / \sqrt{\pi^2 + \ln(C_{n \text{ rest}})^2}; \quad (3.53)$$

$$N_{t \text{ damp}} = -\ln(C_{t \text{ rest}}) / \sqrt{\pi^2 + \ln(C_{t \text{ rest}})^2}; \quad (3.54)$$

$R_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}$ – еквівалентний радіус двох частинок ij та $(i+1)j$, м:

$$R_{ij \Leftrightarrow (i+1)j} = \frac{1}{2/D_{ij} + 2/D_{(i+1)j}}; \quad (3.55)$$

$M_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}$ – еквівалентна маса двох частинок ij та $(i+1)j$, кг:

$$M_{ij \leftrightarrow (i+1)j} = \frac{1}{1/M_{ij} + 1/M_{(i+1)j}}; \quad (3.56)$$

$E_{ij \leftrightarrow (i+1)j}$ – еквівалентний модуль Юнга двох частинок ij та $(i+1)j$, Па:

$$E_{ij \leftrightarrow (i+1)j} = \frac{1}{(1 - v_{ij}^2)/E_{ij} + (1 - v_{(i+1)j}^2)/E_{(i+1)j}}; \quad (3.57)$$

$G_{ij \leftrightarrow (i+1)j}$ – еквівалентний модуль зсуву двох частинок ij та $(i+1)j$, Па:

$$G_{ij \leftrightarrow (i+1)j} = \frac{1}{2(2 - v_{ij})(1 + v_{ij})/E_{ij} + 2(2 - v_{(i+1)j})(1 + v_{(i+1)j})/E_{(i+1)j}}; \quad (3.58)$$

$M_{ij}, M_{(i+1)j}$ – маси частинок ij та $(i+1)j$, кг;

$d_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n, d_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^t$ – віртуальне перекриття частинок ij та $(i+1)j$ в нормальному і тангенціальному напрямках, м;

$D_{ij}, D_{(i+1)j}$ – ефективні діаметри частинок ij та $(i+1)j$, м;

$E_{ij}, E_{(i+1)j}$ – модулі Юнга частинок ij та $(i+1)j$, Па;

$v_{ij}, v_{(i+1)j}$ – коефіцієнти Пуассона частинок ij та $(i+1)j$;

$V_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n, V_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^t$ – нормальний і тангенціальний компонент відносної швидкості поверхні частинок у точці контакту, м/с;

Для процесу взаємодії частинки компонентів корму зі стінкою залежності (3.56)–(3.57) є адекватними, однак для стінки приймається радіус $D_{wall} = \infty$ і маса стінки $M_{wall} = \infty$. У результаті вирази (3.55)–(3.56) перетворюються в

$$\begin{aligned} R_{ij \leftrightarrow wall} &= D_{ij}/2, \\ M_{ij \leftrightarrow wall} &= M_{ij}. \end{aligned} \quad (3.59)$$

Згідно з рис. 3.66, враховуючи вирази (3.43)–(3.46), складемо систему рівнянь рівноваги:

$$\left\{ \begin{aligned}
& \mu p \frac{\pi(D_b^2 - D_s^2)}{4 \left[\frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right] \left[\frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right]} = \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{1j \leftrightarrow \text{wall}}^n + \sum_{i=2}^{\left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor - 1} \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n + \\
& + \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{\left[\frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right] j \leftrightarrow \text{wall}}^n + \sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{i1 \leftrightarrow \text{wall}}^t + \sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} \sum_{j=2}^{\left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor - 1} F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^t + \sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{i \left[\frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right] \leftrightarrow \text{wall}}^t, \\
& \mu p \frac{\pi(D_b^2 - D_s^2)}{4 \left[\frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right] \left[\frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right]} = \sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{i1 \leftrightarrow \text{wall}}^n + \sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} \sum_{j=2}^{\left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor - 1} F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n + \\
& + \sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{i \left[\frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right] \leftrightarrow \text{wall}}^n + \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{1j \leftrightarrow \text{wall}}^t + \sum_{i=2}^{\left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor - 1} \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^t + \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{\left[\frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right] j \leftrightarrow \text{wall}}^t.
\end{aligned} \right. \quad (3.60)$$

Складена система рівнянь (3.61) разом із залежностями (3.41)–(3.60) та залежністю В. В. Братішка розподілу тиску у гвинтовому каналі аналітичним способом дуже складно вирішити через наявність великої кількості змінних у часі. Тому поклавши цю систему як фізико-математичний апарат у програмний пакет Star CCM⁺¹, перейдемо до розгляду методики чисельного моделювання [138, 139].

3.4.3. Результати чисельного моделювання експандера кормів

Для проведення моделювання була побудована сітка 3D моделі експандера з використанням генератора поверхневої сітки, багатограних комірок і екструдера комірок. Геометричні розміри і згенерована сітка із базовим розміром комірки 0,005 м наведено на рис. 3.68.

Геометричні розміри елементів експандера обрані з попереднього аналізу існуючих конструкції [113, 115] з урахування їх мінімізації для відтворення малогабаритного лабораторного обладнання.

¹ У дослідженнях використовувалося програмне забезпечення «Simcenter STAR-CCM+ Academic Pack», власником ліцензії якої є Дніпровський державний аграрно-економічний університет.

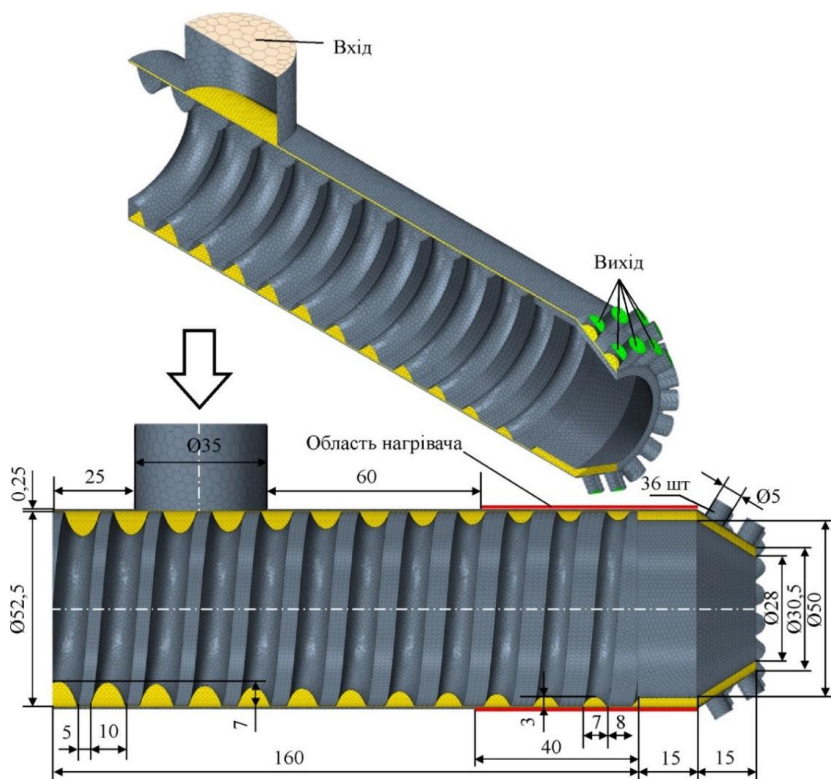


Рис. 3.68. Сітка 3D моделі експандера в Star CCM+

Моделювання проводилося із застосуванням градієнтів у тривимірному просторі моделі руху розділеної течії багатофазної ейлерової суміші (ММР) з використанням допустимої двошарової $k-\epsilon$ моделі турбулентності і багатофазного рівняння стану. Симуляція є нестационарною неявною. Теплопровідні процеси підпорядковувалися моделі розділеної багатофазної температури. Моделювання проводилося в полі сили тяжіння. Вектор сили тяжіння є таким: $(0; 0; -9,81)$ м/с².

Фізичними моделями для симуляції процесу руху компонентів корму в експандері у програмному пакеті Star CCM+ є: тривимірна модель, нестационарна неявна модель, математична модель однокомпонентного газу (повітря), модель ідеального газу (повітря), модель турбулентної течії повітря, $k-\epsilon$ модель турбулентності повітря, ізотермічне рівняння енергії рідини, усереднене по Рейнольдсу рівняння

Нав'є-Стокса, роздільна течія, методи градієнта і границь, Лагранжева модель багатофазного середовища, модель багатофазна взаємодія, модель дискретних елементів (DEM), поле сили тяжіння.

Насіння представлено у вигляді Лагранжевої фази відповідно до таких моделей: постійної щільності, сили градієнта тиску, сили опору частинок, сферичних частинок, однокомпонентних твердих частинок, частинок DEM. Для прикладу, за компонент корму обрано насіння сої, яке згідно з проведеним аналізом літературних джерел має такі фізико-механічні властивості: коефіцієнт Пуассона – 0,2; модуль Юнга – 0,2 МПа; щільність – 700 кг/м³; коефіцієнт тертя спокою – 0,58; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5; коефіцієнт опору кочення – 0,3; діаметр насіння – 0,01 м [140]. Взаємодія між насінинами підпорядковувалася моделі контактної взаємодії Герца-Міндліна: коефіцієнт тертя спокою – 0,58; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5. За властивості середовища були прийняті такі параметри: середовище – повітря; динамічна в'язкість – $1,85508 \cdot 10^{-5}$ Па·с; турбулентне число Прандтля – 0,9; прискорення вільного падіння – 9,8 м/с²; температура – 293 К; тиск – 101325 Па.

Граничні параметри обрані такі. Верхня площина горловини (вхід) для подачі представлена моделлю масового потоку кормових компонентів, яка поступає до гвинта самопливом під дією сили тяжіння. Отвори формуючої насадки (вихід) представлені вільним потоком суміші, фізичні параметри якого формуються як результат моделювання.

Гвинт обертається навколо власної осі з постійною частотою – 120 об/хв.

Вирішувач у Star CCM+ обрано нестационарний неявний із кроком за часом – 0,01 с. Дискретизація за часом першого порядку. Максимальне число ітерацій за одиницю часу – 10, що забезпечую необхідну збіжність результату. Час симуляції – 60 с.

У результаті проведеної симуляції роботи експандера отримано розподіл тиску (відносно атмосферного) в порожнині між гвинтом і циліндром (рис. 3.69). З рис. 3.69 наочно видно, що тиск збільшується по осі гвинта в напрямку переміщення багатофазної суміші. Збільшення тиску пояснюється зменшенням об'єму порожнини вздовж осі гвинта. На виході з отворів формуючої насадки значення тиску становить $14,2 \pm 0,02 \cdot 10^5$ Па.

Моделювання проводилося із застосуванням градієнтів у тривимірному просторі моделі руху розділеної течії багатофазної ейлерової суміші (ММР) з використанням допустимої двошарової k-ε-моделі

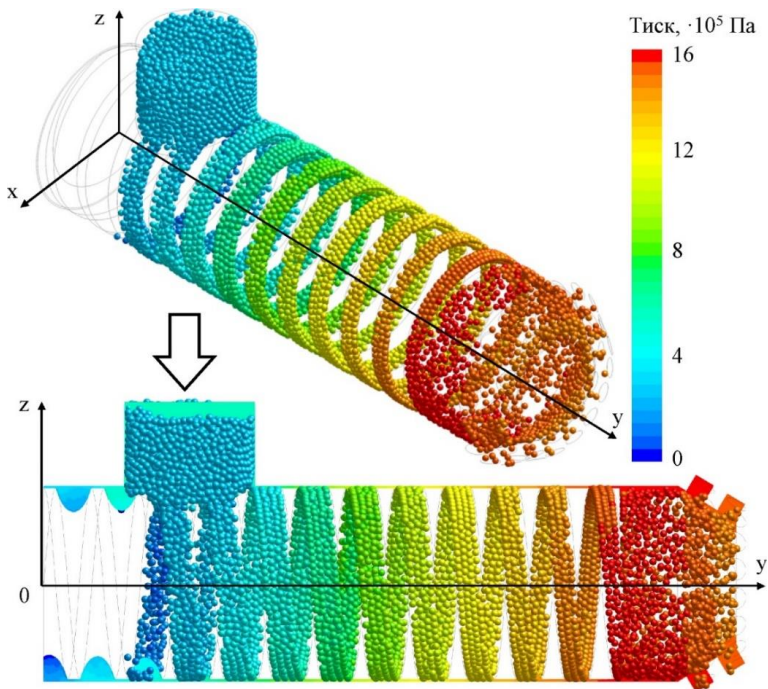


Рис. 3.69. Розподіл тиску (відносно атмосферного) у гвинтовому каналі експандера

турбулентності й багатофазного рівняння стану. Симуляція є нестационарною неявною. Теплопровідні процеси підпорядковувалися моделі розділеної багатофазної температури. Моделювання проводилося в полі сили тяжіння. Вектор сили тяжіння є таким $(0; 0; -9,81) \text{ м/с}^2$.

Компоненти корма були прийняті у трьох фазах: тверде (суцільне), рідина (вологість), газ (пар). Тверда фаза була представлена вкрапленням твердих (суцільних частинок) з такими фізичними властивостями: щільність $- 800 \text{ кг/м}^3$; коефіцієнт теплопровідності $- 0,285 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; коефіцієнт питомої теплоємності $- 2404,6 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$. Рідка фаза мала фізичні властивості води, а саме: динамічна в'язкість $- 8,88\cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$; щільність $- 997 \text{ кг/м}^3$; коефіцієнт теплопровідності $- 0,620 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; коефіцієнт питомої теплоємності $- 4181,7 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$. Газоподібна фаза мала фізичні властивості пари, а саме: динамічна в'язкість $- 1,267\cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$; коефіцієнт теплопровідності $-$

0,025 Вт/(м·К); коефіцієнт питомої теплоємності – 1938,2 Дж/(кг·К). Співвідношення об'ємних часток були прийняті постійними: тверда фаза – 0,5, рідка фаза – 0,45, газоподібна фаза – 0,05. Початкова температура компонентів кормів – 25 °С. Абсолютний тиск навколишнього середовища – 101,325 кПа. Фазова взаємодія реалізована на основі моделі MMP-MMP.

Граничні параметри обрані такі. Верхня площина горловини (вхід) для подачі представлена моделлю масового потоку суміші, яка поступає до гвинта самопливом під дією сили тяжіння. Отвори формуючої насадки (вихід) представлені вільним потоком суміші, фізичні параметри якого формуються як результат моделювання. Зона нагрівача має постійну температуру 200 °С.

Гвинт обертається навколо власної осі з постійною частотою – 60 об/хв.

Вирішувач у Star CCM+ обрано нестационарний неявний із кроком за часом – 0,01 с. Дискретизація за часом першого порядку. Максимальне число ітерацій за одиницю часу – 10, що забезпечую необхідну збіжність результату. Час симуляції – 60 с.

У результаті проведеної симуляції роботи експандера отримано розподіл тиску (відносно атмосферного) в порожнині між гвинтом і циліндром (рис. 3.70). З рис. 3.70 наочно видно, що тиск збільшується

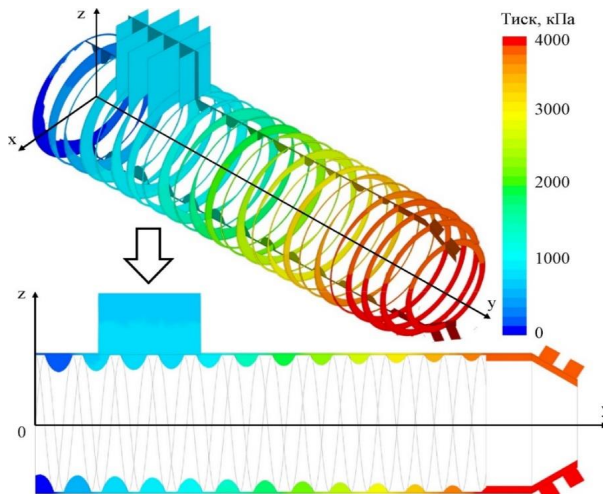


Рис. 3.70. Розподіл тиску (відносно атмосферного) в порожнині між гвинтом і циліндром експандера

по осі гвинта в напрямку переміщення багатофазної суміші. Збільшення тиску пояснюється зменшенням об'єму порожнини вздовж осі гвинта. На виході з отворів формуючої насадки значення тиску становить $3,82 \pm 0,06$ МПа.

У результаті проведеної симуляції роботи експандера отримано розподіл щільності суміші фаз у порожнині між гвинтом і циліндром (рис. 3.71). Ущільнення багатофазної суміші пропорційне збільшенню тиску в порожнині між гвинтом і циліндром експандера. Так, на виході з отворів формуючої насадки значення щільності суміші є найбільшим і становить 892 ± 5 кг/м³.

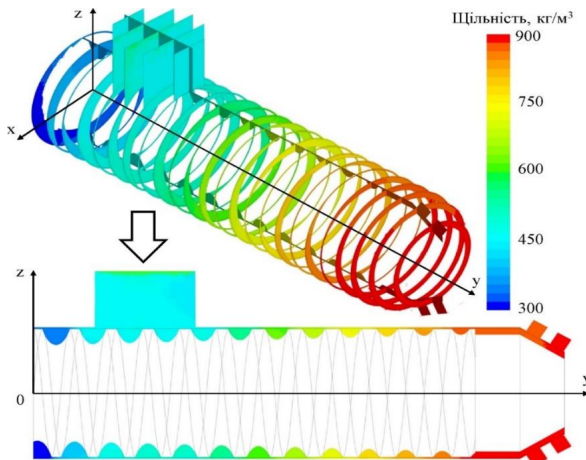


Рис. 3.71. Розподіл щільності суміші фаз у порожнині між гвинтом і циліндром експандера

У результаті проведеної симуляції роботи експандера отримано векторне поле (рис. 3.72) і лінії потоку багатофазної суміші в порожнині між гвинтом і циліндром (рис. 3.73).

Дані візуалізації наочно показують рух багатофазної суміші під дією обертання гвинта. Найбільша швидкість становить $0,157 \pm 0,005$ м/с, середня швидкість – $0,113 \pm 0,005$ м/с. З рис. 3.72 видно, що швидкість виходу сформованих експандатів зменшується до $0,021 \pm 0,003$ м/с.

Враховуючи загальну площу отворів ($36 \text{ шт.} \cdot 3,14 \cdot (0,005 \text{ м}/2)^2 = 0,0007065 \text{ м}^2$), отримуємо теоретичну об'ємну продуктивність $0,021 \text{ м/с} \cdot 0,0007065 \text{ м}^2 = 0,0007065 \text{ м}^3/\text{с} = 0,0534114 \text{ м}^3/\text{год}$, або в перерахунку на теоретичну масову продуктивність (враховуючи щільність згідно з рис. 2.71) $892 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,0534114 \text{ м}^3/\text{год} = 47,64 \text{ кг/год}$.

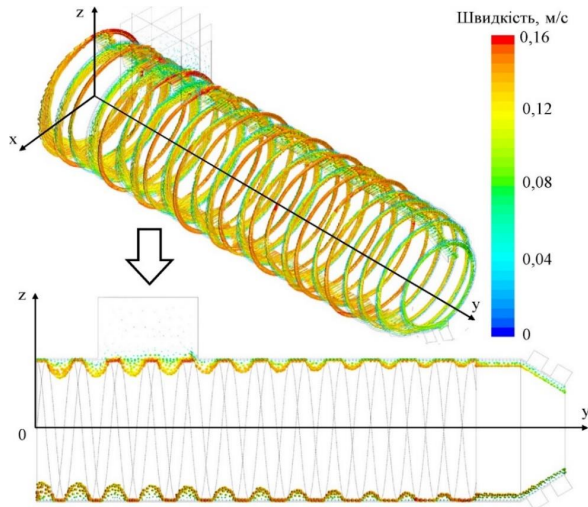


Рис. 3.72. Векторне поле суміші фаз у порожнині між гвинтом і циліндром експандера

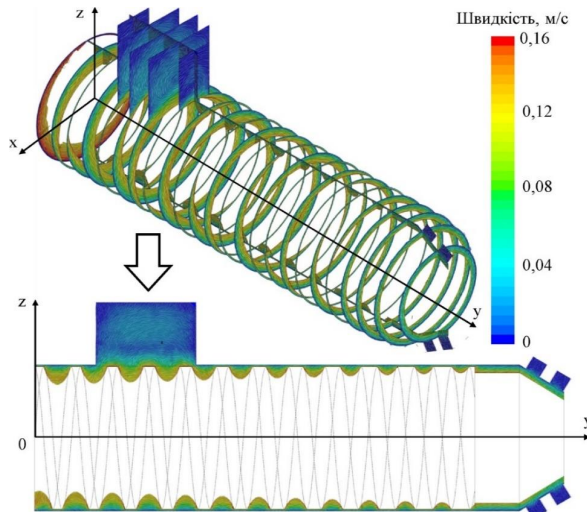


Рис. 3.73. Лінії потоку суміші фаз у порожнині між гвинтом і циліндром експандера

Рис. 3.73 демонструє лінії потоку багатофазної суміші. Турбулентний потік створюється внаслідок обертання гвинта навколо власної осі. Поступове ущільнення багатофазної суміші спричиняє

зменшення швидкості переміщення через збільшення сил опору і в'язкого тертя.

У результаті проведеної симуляції роботи експандера отримано розподіл температури суміші фаз у порожнині між гвинтом і циліндром (рис. 3.74).

Температурне поле багатофазної суміші виникає внаслідок тертя суміші об стінки циліндра і його стискання. Окрім того, в зоні нагрівача спостерігається значне підвищення температури внаслідок явища теплопровідності. Середня температура багатофазної суміші становить 154 ± 5 °С. Температура сформованих експандатів на виході становить 146 ± 4 °С.

Проведена симуляція процесу експандованого приготування кормів у програмному пакеті Star CCM+ дає передумови для обґрунтування діапазону раціональних параметрів експандера. Симуляція роботи експандера дає змогу визначати такі критерії досліджень: тиск у порожнині між гвинтом і циліндром експандера, щільність отриманих експандатів, продуктивність експандера, температурне скалярне поле і векторне поле швидкостей багатофазної суміші. Факторами досліджень слід обрати: співвідношення фаз багатофазної суміші, частоту обертання гвинта, температуру нагрівача, діаметр, довжину і крок гвинта.

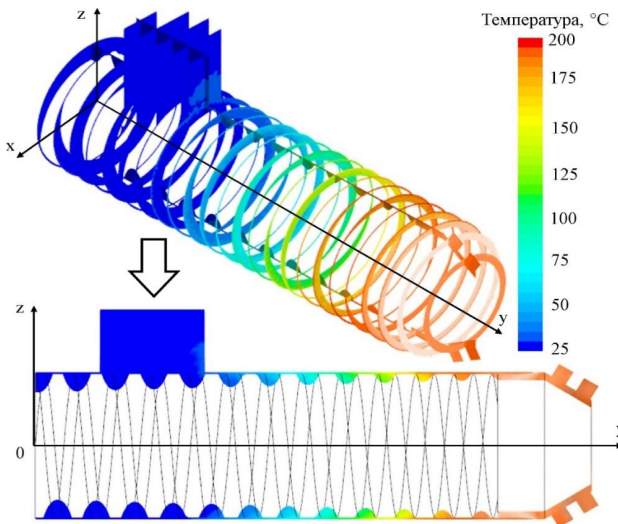


Рис. 3.74. Розподіл температури суміші фаз у порожнині між гвинтом і циліндром експандера

3.5. Шнековий диспергатор для подрібнення зернової сировини

Автор: Гезь Я. В., Миколенко С. Ю.

3.5.1. Доцільність диспергування зерна для харчових продуктів

У багатьох галузях харчової промисловості зерно є цінним сировинним ресурсом. Проте, однією з найважливіших сфер застосування зернової сировини є використання продуктів її переробки при виготовленні хлібобулочних, макаронних і кондитерських виробів. Хліб – це продукт щоденного вжитку, тому доцільним є збагачення його такими сполуками, як: вітаміни, мінеральні речовини, харчові волокна, білок. Основною сировиною для виробництва хліба слугує пшеничне борошно вищих сортів. Під час виробництва з нього видаляють оболонки, алейроновий шар, зародок, внаслідок чого знижується вміст клітковини, мінеральних речовин і вітамінів. Тому перспективним напрямом є отримання диспергованої рослинної сировини шляхом подрібнення її на диспергаторі з подальшим використанням здрібненої маси як напівфабрикату для отримання хлібобулочної та макаронної продукції функціонального призначення.

Використання диспергування для обробки зерна дозволяє зберегти й надалі використовувати цінні для організму людини периферійні частини зерна, а саме оболонки, алейроновий шар, зародок. При цьому відмічається підвищена концентрація і засвоюваність біологічно активних речовин при проростанні зерна під час замочування [141]

Виробництво збивного бездріжджового хліба із диспергової зернової маси підвищує його харчову цінність [142]. Також доведено позитивний вплив густої закваски, виготовленої із диспергованого зерна жита на мікроструктуру тіста й хлібобулочних виробів [143]. Автори [144] розробили технологію отримання макаронних виробів із диспергованого зерна пшениці, яка дозволяє скорочувати тривалість варіння виробів.

Існує багато технічних рішень щодо використання диспергування в харчовій промисловості. Сьогодні обробку на диспергаторах застосовують для рослинної сировини з метою надання їй певних технологічних характеристик. Так, для отримання диспергової зернової маси використовують біоактивоване зерно, тобто піддане контакту з водою шляхом замочування протягом 12–48 год. Відповід-

но для подрібнення такого зерна й отримання на виході гомогенної маси необхідна спеціальна установка – диспергатор. На сьогодні існує велика кількість диспергаторів, які можуть використовуватися в харчовій промисловості, але всі вони відрізняються різною природою рушійної сили процесу здрібнення, а саме: гідродинамічні, масові, механічні, термічні, масообмінні, електромагнітні, хімічні й мікробіологічні. Для подрібнення біоактивованого зерна необхідно використовувати диспергатори, засновані на механічних методах здрібнення, та як таке зерно характеризується достатньо високим вмістом вологи – близько 50%.

3.5.2. Аналіз обладнання для диспергування зернової сировини

Процес здрібнення матеріалу пов'язаний з енергетичною взаємодією джерела енергії і безпосередньо матеріалу, який підлягає подрібненню. Перенесення енергії можливе при контакті у вигляді імпульсу або у вигляді кванта випромінювання. Енергетичний вплив зовнішніх сил на матеріал, який підлягає подрібненню, може супроводжуватися перенесенням маси, теплоти, емісією електронів та іншими фізико-хімічними ефектами.

За характером напруженого стану, який створюється в об'єкті, що руйнується, всі процеси можна розділити на процеси, які викликають точковий, лінійний, плоский, об'ємний і комбінований напружений стан.

На сьогодні застосовують велику кількість фізичних способів впливу на матеріал, який подрібнюється, попри те основним способом подрібнення залишається механічне [145].

Процес утворення нової поверхні у твердому тілі характеризується низькою енергетичною ефективністю незалежно від сировини, яку переробляють. За теорією П. А. Ребіндера, на поверхневу енергію перетворюється тільки надлишок енергії пружної деформації накопиченої матеріалом (ККД процесу становить менше ніж 1%) [146, 147]. Залежно від матеріалу і характеру його використання до диспергування висувають певні вимоги, такі як дисперсність, чистота, збереження тощо [148].

При диспергуванні відбувається порушення вторинної структури матеріалу. Після подрібнення відбувається деструкція полімерних ланцюгів. Швидкість механічної деструкції можна визначити інтенсивністю механічних напружень. При диспергуванні природних органічних полімерів типовою є наявність граничної деструкції. В зоні

граничної деструкції механічна енергія, яка передається твердій речовині, витрачається виключно на міжмолекулярні переміщення полімерних ланцюгів [149].

У роботі [150] проведено дослідження параметрів подрібнення пророщеного зерна пшениці, жита і тритикале в сушарці-диспергаторі (рис. 3.75). Відмічено, що зі збільшенням температури нагрітого повітря пророщені зерна пшениці, жита і тритикале змінюють свої структурно-механічні властивості. При подрібненні зменшується гранична деформація і тіла руйнуються як пружно крихкі [151]. Міцність пророщеного зерна своєю чергою знижується. Також на міцнісні властивості зерна вплив температури позначається менш помітно, ніж вплив вологості.

Структурно-механічні властивості пророщеного зерна в умовах динамічного навантаження при збільшенні його швидкості свідчать, що межа міцності у всіх дослідних зразках збільшується, а пластичні властивості до моменту подрібнення значно зменшуються [152].

Під час дослідження залежності гранулометричного складу порошкоподібного матеріалу жита при параметрах: початкова вологість сировини – 42 %, температура сушильного агента – 90 °С, продуктивність установки – 0,01389 кг/с, – змінювали частоту обертання роторного подрібнювача, а саме у випадку 1470 об/хв, 1845 об/хв,

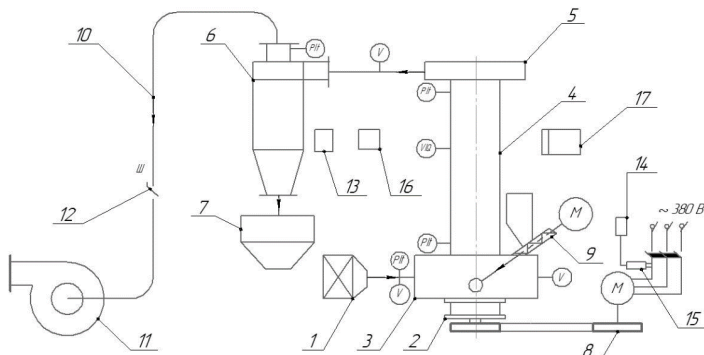


Рисунок 3.75 – Схема експериментального станда для проведення досліджень процесу подрібнення пророщеного зерна:

1 – калорифер; 2 – ротор; 3 – робоча камера подрібнювача; 4 – пневмотруба; 5 – розкручуючий равлик; 6 – циклон; 7 – приймальний бункер; 8 – шків; 9 – шнековий живильник; 10 – система повітропроводів; 11 – вентилятор; 12 – шиберна заслінка; 13 – анемометр testo-435; 14 – цифровий мультиметр APPA-109N; 15 – вимірювальні кліщі; 16 – логгер testo 177 – T4; 17 – інвертор

12220 об/хв, 2595 об/хв, 2970 об/хв. Збільшення частоти обертання подрібнювача зумовлює зниження медіального діаметра подрібнених частинок; підвищення температури сушильного агента зумовлює зменшення величини медіального діаметра; підвищення продуктивності збільшує медіальний діаметр; підвищення вологості матеріалу збільшує медіальний діаметр.

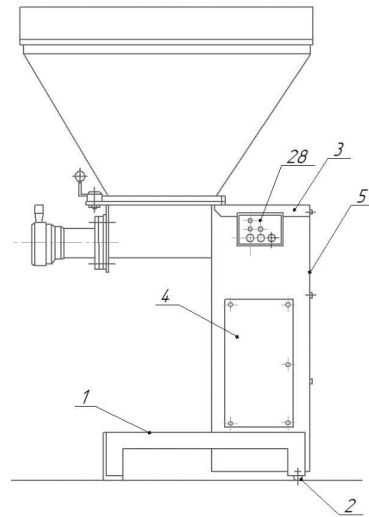
Ступінь подрібнення матеріалу залежить від типу подрібнювача, частоти обертання ротора, діаметра ротора і вологості оброблюваного матеріалу [153].

Для отримання диспергованої рослинної сировини існує велика кількість подрібнювального обладнання. Так, для виготовлення хлібобулочних, макаронних виробів, а також хлібців із пророщеного зерна використовують диспергатор [154] (рис. 3.76). Пристрій може бути додатково оснащений дозатором та пристроєм для дозованої подачі олії.

Наявність кілець, встановлених між решітками та ножами вузла подрібнення, дає можливість фіксувати відстань між елементами, що не допускає стискання та спресовування зернової маси з пророслого зерна під час її впливу на вузол подрібнення. Застосування пристрою для дозованої подачі олії дає можливість підвищити якість подрібнення зернової сировини з пророслого зерна при використанні дрібних решіток (ϕ 2 мм).

Для отримання диспергованої рослинної зернової маси рекомендована вологість пророщеного зерна становить 30–32%, діаметр решітки може встановлюватися залежно від потрібного розміру частинок і становить 2, 3 і 4 мм.

Пристрій для подрібнення харчових продуктів [155] може бути використаний для приготування тіста із замоченої сировини у виробництві зернового хліба (рис. 3.77). Стабільність діаметра решіток і ножів забез-



**Рисунок 3.76 – Диспергатор
(патент UA 70499):**

1 – каркас; 2 – віброізолююча опора; 3, 4, 5 – змінні захисні панелі; 28 – пульт керування

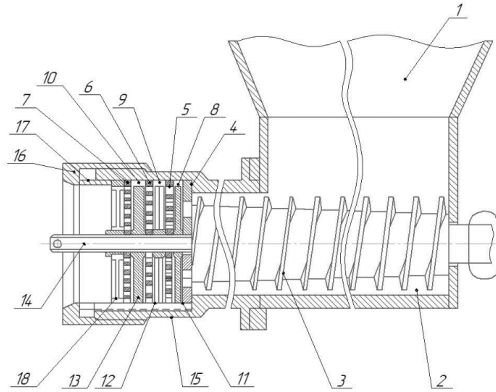


Рис. 3.77. Пристрій для подрібнення (патент RU 2297281):

1 – завантажувальний бункер; 2 – камера; 3 – шнек; 4, 5, 6, 7 – решітки; 8, 9, 10 – відділи; 11, 12, 13 – лопатеві ножі; 14 – вал; 15 – розточування; 16 – гайка; 17 – кільце; 18 – хрестовина

печеує зниження спожитої потужності приводу, тобто енергетичних витрат під час експлуатації.

Лопаті ножа або їхні передні поверхні виконані однакової форми з лопатями, розташованими поряд із ними з боку шнека ножа в межах осьового розміру останнього. Це дає можливість їх перестановки в міру сточування під час переточувань у відділення з меншим осьовим розміром.

Передня поверхня лопаті ножа або її частина, що примикає до лінії перетину з площиною решітки з боку виходу з камери, виконана увігнутою. Кут між дотичною площиною до увігнутої поверхні і площиною решітки зменшується в напрямку від лінії їх перетину від 30–45 ° до 0–25 °.

Відомий пристрій [156] для переробки зерна кукурудзи, а саме для подрібнення в продукт, придатний для формування тістового напівфабрикату (рис. 3.78). Обробку зерна проводять шляхом подрібнення в контрольованих умовах під впливом вологості і температури. Цей процес особливо пристосований для виготовлення тіста із суміші кукурудзи та вапна.

Зерно з додаванням вапна подається в камеру для подрібнення і здрібнюється в ній до порошку внаслідок впливу бруска-розбивача. Продукт подрібнюється на пластинах розбивача, встановлених по

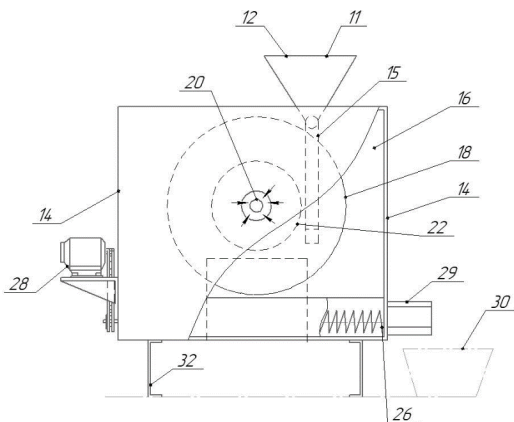


Рис. 3.78. Диспергатор (патент US 4463022):

11 – бункер; 12 – подача продукту; 14 – корпус; 15 – завантажувальний жолоб;
16, 18 – камера; 20, 22 – робоче колесо; 26 – шнек; 28 – електродвигун; 29 –
випускний патрубок; 30 – контейнер; 32 – монтажні балки

окружності робочої зони камери здрібнення. Під час подрібнення зерновий продукт піддають дії пари, що утворюється завдяки вмісту вологи в зерні, тертя та теплоти, що подається. Пара підтримується шляхом блокування проникнення повітря в той час, як одержують екстраговане борошно і варений продукт із сухого борошна. Параметри роботи є керованими, що сприяє економії енергії, уникненню утворення стічних вод, висушування продукту та втрат при перероблюванні, а також скороченню загального часу обробки.

Передбачено спосіб приготування подрібненого плинного вареного зерна або кукурудзяного продукту безперервно без необхідності додавання води або використання етапу сушіння, що включає етапи:

- подачу кукурудзяних ядер у внутрішню камеру подрібнення, в якій підтримується температура в межах від 93 °C до 204 °C, не допускаючи надходження повітря;
- циркулююче повітря через камеру подрібнення в зовнішній герметичній камері, що підтримується при температурі в межах від 82 °C до 149 °C, проводять для видалення вологи з подрібненої кукурудзи під час здрібнення в замкнутому циркулюючому циклі, до утворення атмосферних парів у камері подрібнення. Подрібнена до бажаної фракції кукурудза, яка

надходить, стабілізується при майже однаковому вмісті вологи в межах від 5 до 15 %;

- подрібнення кукурудзи до потрібного розміру та протягом певного інтервалу, достатнього для варіння кукурудзи при встановленому співвідношенні температури та розміру частинок;
- виведення звареної подрібненої кукурудзи без істотного введення в камеру неопаленого або сухого повітря.

Цей метод винаходу і пристрій підходять для роботи з кукурудзою як вибране зерно, інше зерно також може бути використано з коригуванням параметрів варіння відповідно до характеристики бажаного кінцевого продукту. Змінюючи параметри приготування, можна значно розширити асортимент зерна та отриманих продуктів.

3.5.3. Математична модель взаємодії зернової сировини зі шнековим живильником при диспергуванні

У харчовій промисловості для здрібнення вихідної сировини задля відповідності технології перероблення широко використовують процес диспергування. Відомо, що процес здрібнення рослинної сировини характеризується значними затратами енергії, що зумовлено високою міцністю й анізотропією її властивостей. Висока міцність сировини зумовлена особливістю морфологічного складу рослинної тканини [145].

На сьогодні використовують велику кількість фізичних способів впливу на матеріал, який подрібнюється, попри те основним способом залишається механічне подрібнення. Процес утворення нової поверхні у твердому тілі характеризується низькою енергетичною ефективністю незалежно від сировини, яку переробляють [146, 147]. Залежно від матеріалу й напряму його використання до диспергування висувають певні вимоги, як, наприклад, дисперсність вихідного продукту, його мікробіологічну чистоту [148].

При диспергуванні відбувається порушення вторинної структури матеріалу, тоді як після подрібнення відбувається деструкція полімерних ланцюгів. Швидкість механічної деструкції можна визначити інтенсивністю механічних напружень. При диспергуванні природних органічних полімерів, до яких належить зернова сировина, типовою є наявність граничної деструкції. В зоні граничної деструкції механічна енергія, яка передається твердій речовині, витрачається виключно на міжмолекулярні переміщення полімерних ланцюгів [149]. Існує ба-

гато технічних рішень щодо використання диспергування в харчовій промисловості. На сьогодні обробку на диспергаторах застосовують для рослинної сировини з метою надання їй певних технологічних характеристик. Так диспергування зернової сировини, попередньо активованої шляхом замочування, дозволяє одержувати пастоподібну дисперговану зернову масу, яку застосовують для виробництва цільнозернових хлібних виробів [157]. На процес подрібнення зернової сировини впливає ряд факторів, одним з яких є переміщення матеріалу за допомогою шнекового живильника.

Удосконаленню гвинтового транспортного механізму присвячена досить велика кількість наукових робіт. Так, відомі пристрої [158, 159] для подрібнення зернової сировини, удосконалення яких полягає у зміні конструкції шнекового живильника. Таке конструктивне рішення дозволяє підвищити продуктивність, дисперсність, однорідність зернової маси на виході, а також знизити енергоємність.

Гвинтові транспортні механізми, що призначаються для переміщення сипкого матеріалу, досить широко використовуються в різноманітних галузях сільського господарства. У наукових працях [160–167] багато уваги приділяється питанням дослідження навантаження на гвинтові робочі органи, розрахунку і проектування цього навантаження. Водночас при застосуванні шнекових живильників у пристроях для подрібнення харчової сировини виникають питання, що потребують додаткових досліджень. Перш за все актуальною лишається проблема дослідження впливу додаткового тиску, необхідного для роботи при завантаженні матеріалу на процес його переміщення. Не менш важливим також є питання визначення швидкості проходження через різальний механізм зернового матеріалу для його подрібнення в диспергаторі. Розробка математичної моделі взаємодії зернового насипного матеріалу зі шнековим живильником дозволила б визначити кінематичні характеристики руху зернової суміші в диспергаторі задля підвищення ефективності його роботи. Для вирішення вказаної проблематики завданням роботи стали розробка схеми до математичної моделі взаємодії зернового матеріалу зі шнеком диспергатора та отримання диференціального рівняння руху матеріалу, що описує перехідний режим під час пуску пристрою.

Для аналізу руху зернової суміші приймаються такі припущення: при усталеному режимі роботи об'єм шнека повністю заповнений продуктом; об'єм матеріалу, що заповнює шнек, на будь-якому кроці має такі ж кінематичні характеристики, як і об'єм, що заповнює сусідній крок; під час роботи диспергатора при завантаженні забезпечується сталий тиск q (рис. 3.79); товщина витка шнека є незмінною.

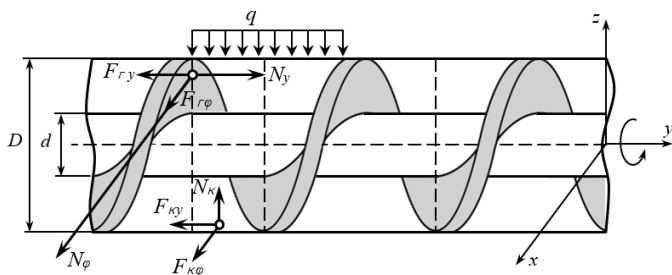


Рис. 3.79. Розрахункова схема до математичної моделі взаємодії зернового насипного матеріалу зі шнеком диспергатора для подрібнення зернової сировини

Розглядаючи рух матеріалу, що заповнює один виток шнека як одне ціле, спробуємо знайти швидкість руху центра мас та кутову швидкість, вважаючи їх сталими. Для визначення цих сталих величин розглянемо перехідний режим руху цього елемента матеріалу під час пуску диспергатора.

Диференціальні рівняння руху виділеного масиву матеріалу мають вигляд:

$$M\ddot{y}_c = \sum_1^n F_{ky}; \quad (3.61)$$

$$I_y\ddot{\phi} = \sum m_y(F_{\kappa}); \quad (3.62)$$

де M – маса об'єму матеріалу;

I_y – її осьовий момент інерції відносно осі y ;

\ddot{y}_c – прискорення центра мас;

$\ddot{\phi}$ – кутове прискорення;

F_{κ} – сила, що діє на по поверхню масиву;

F_{ky} – проекція сили, що діє на поверхню масиву на напрямок руху;

$m_y(F_{\kappa})$ – момент сили F_{κ} відносно осі y (рис. 3.79).

На рис. 3.79 наведені сили, що діють на окремі граничні частини суміші, що взаємодіє з диспергатором.

Нормальна реакція гвинтової поверхні при незмінній товщині витка представлена двома складниками: осьовою N_y і обертальною N_{ϕ} , причому:

$$N_y = N \cos \alpha, \quad (3.63)$$

$$N_\phi = N \sin \alpha, \quad (3.64)$$

де α – кут нахилу гвинтової лінії, по якій рухається окрема частинка суміші.

Силу тертя на гвинтовій поверхні будемо визначати як $F_f = fN$, де f – коефіцієнт тертя.

Вектор сили тертя дотичний до гвинтової лінії, на рис. 3.79 він представлений двома складниками F_{fy} і $F_{f\phi}$, причому $F_{fy} = fN \sin \alpha$, а $F_{f\phi} = fN \cos \alpha$. Сили тертя, що виникають при взаємодії суміші з корпусом диспергатора, обумовлені нормальною реакцією N_k . Складники сили тертя будемо визначати як:

$$F_{ky} = fN_k \cos \beta, \quad (3.65)$$

$$F_{k\phi} = fN_k \sin \beta, \quad (3.66)$$

де β – кут, який утворює вектор швидкості з осьовим напрямом, тобто

$$\cos \beta = \frac{V_y}{V} = \frac{V_y}{\sqrt{V_y^2 + V_\phi^2}}; \quad \sin \beta = \frac{V_\phi}{\sqrt{V_y^2 + V_\phi^2}}. \quad (3.67)$$

Цілком очевидно, що формулами (3.63–3.66) будуть визначатися сили, які діють на об'єм матеріалу, який заповнює один виток диспергатора. Тоді диференційовані рівняння (3.61) і (3.62) набудуть вигляду

$$M\ddot{y} = N \cos \alpha - fN \sin \alpha - fN_k \cos \beta; \quad (3.68)$$

$$I\ddot{\phi} = N \sin \alpha R + fN \cos \alpha R - fN_k \sin \beta R_k. \quad (3.69)$$

У рівнянні (3.69) в першому наближенні приймається:

$R = (D-d)/2$ – середній радіус гвинтової поверхні;

$R_k = D/2$ – радіус корпусу диспергатора (рис. 3.79);

N_k за відомого тиску на вході в диспергатор передбачається визначити як $N_k = q2\pi RH$.

Враховуючи, що зміни величини y і ϕ залежні, а саме

$$y = H\phi/2\pi, \quad (3.70)$$

де H – крок шнека диспергатора, з рівняння (3.68) отримуємо

$$N(\cos \alpha - f \sin \alpha) = \frac{MH\ddot{\phi}}{2\pi} + fN_k \cos \beta.$$

Звідси

$$N = \ddot{\phi} \frac{MH}{2\pi(\cos\alpha - f \sin\alpha)} + N_{\kappa} \frac{\cos\beta}{\cos\alpha - f \sin\alpha}. \quad (3.71)$$

Підставляючи визначену таким чином нормальну реакцію N у формулу (3.69), отримуємо:

$$I_{\phi} \ddot{\phi} = \ddot{\phi} \frac{MHR(\sin\alpha + f \cos\alpha)}{2\pi(\cos\alpha - f \sin\alpha)} - fN_{\kappa} \sin\beta R_{\kappa} + N_{\kappa} \frac{\cos\beta(\sin\alpha + f \cos\alpha)R}{\cos\alpha - f \sin\alpha},$$

або

$$\ddot{\phi} \left(\frac{MHR(\sin\alpha + f \cos\alpha)}{2\pi(\cos\alpha - f \sin\alpha)} - fN_{\kappa} \sin\beta R_{\kappa} + N_{\kappa} \frac{\cos\beta(\sin\alpha + f \cos\alpha)R}{\cos\alpha - f \sin\alpha} \right) = N_{\kappa} \frac{R \cos\beta(\sin\alpha + f \cos\alpha) - \sin\beta(1 - f \operatorname{tg}\alpha)R_{\kappa}}{1 - f \operatorname{tg}\alpha}. \quad (3.72)$$

Диференціальне рівняння (3.72) необхідно розв'язувати, беручи до уваги, що формула (3.67) (у зв'язку з тим, що згідно з виразом (3.70)

$$V_y = \dot{y} = \frac{H\dot{\phi}}{2\pi})$$

набуває вигляду

$$\cos\beta = \frac{\frac{H\dot{\phi}}{2\pi}}{\sqrt{\left(\frac{H\dot{\phi}}{2\pi}\right)^2 + (\dot{\phi}R_{\kappa})^2}} = \frac{\frac{H}{2\pi}}{\sqrt{\left(\frac{H}{2\pi}\right)^2 + R_{\kappa}^2}} = \frac{H}{\sqrt{H^2 + R_{\kappa}^2 4\pi^2}}, \quad (3.73)$$

$$\sin\beta = \frac{\dot{\phi}R_{\kappa}}{\sqrt{\left(\frac{H\dot{\phi}}{2\pi}\right)^2 + (\dot{\phi}R_{\kappa})^2}} = \frac{R_{\kappa}}{\sqrt{\left(\frac{H}{2\pi}\right)^2 + R_{\kappa}^2}} = \frac{R_{\kappa}}{\sqrt{H^2 + R_{\kappa}^2 4\pi^2}}. \quad (3.74)$$

При розв'язанні диференціального рівняння (3.72) передбачається, що на початку процесу зернова суміш обертається з кутовою швидкістю шнека, а рух в осьовому напрямку виникає при створенні достатнього тиску q при подачі матеріалу в диспергатор.

На переміщення продукту в шнеку диспергатора впливають такі фактори, як: сила тертя, вологість, стан поверхні й адгезійні властивості частинок матеріалу, що обробляється. Запропонована досить проста математична модель, що дозволяє визначити кінематичні характеристики руху зернової суміші в диспергаторі залежно від його конструктивних характеристик. Отримано диференціальне рівняння руху матеріалу (3.72), що описує перехідний режим під час пуску пристрою. Встановлені залежності дозволяють більш точно врахувати особливості руху зернового матеріалу в диспергаторі відповідно до розробленої математичної моделі [168, 169].

Розділ 4. СПОСОБИ, МЕТОДИКИ І ПРИСТРОЇ АНАЛІЗУ ВЛАСТИВОСТЕЙ ХАРЧОВОЇ ПРОДУКЦІЇ І КОРМІВ

4.1. Спосіб автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів

Автори: Алієв Е. Б., Миколенко С. Ю., Алієва О. Ю.

Структурно-механічні (або реологічні) властивості харчових продуктів і кормів характеризують їх опір впливу зовнішньої механічної дії, що обумовлено їх будовою і структурою. До основних реологічних властивостей матеріалів належать пружність, пластичність, в'язкість і міцність. У одного і того самого матеріалу залежно від його стану й умов навантаження проявляються в різному ступені різні реологічні властивості [170]. Тому розробка узагальненого універсального об'єктивного способу визначення структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів є актуальною.

Відомий спосіб вимірювання твердості хліба від Universal Testing Machine [171], спрямований на кількісне визначення сили пружності, необхідної для стиснення випеченого виробу на 25% деформації від початкової товщини. В описі способу зазначено, що твердість можна вважати мірою свіжості та якості. Запропонований спосіб визначає конструктивно-режимні параметри обладнання та метод розрахунку отриманих даних.

Недоліком зазначеного способу є відсутність вимірювання інших структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів, таких як: модуль пружності, показники статичного й динамічного гістерезису пружності.

Відомий спосіб визначення реологічних властивостей [171], який включає поетапне визначення граничного напруження матеріалу і реалізований за допомогою пенетрометра.

Недоліком зазначеного способу є відсутність автоматизації процесу вимірювання структурно-механічних властивостей харчових

продуктів і кормів, що створює умови суб'єктивності результатів вимірювання й підвищує витрати на його здійснення.

Метою є підвищення ефективності процесу досліджень структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів шляхом повної автоматизації. Це досягається тим, що спосіб автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів, згідно з винаходом, дозволяє визначати в автоматичному режимі силу пружності, модуль пружності, показники статичного й динамічного гістерезису пружності харчових продуктів і кормів [172, 173].

Спосіб автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів включає такі етапи:

1. Харчову масу розміщують на рівну горизонтальну поверхню робочого столу в зону під індентором циліндричної форми (діаметр – 21 мм, площа робочої поверхні – $S = 3,464 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$), закріпленому на тензодатчику, що переміщується у вертикальній площині. Тензодатчик із закріпленням на ньому індентором повинен бути відкалібрований і в стані спокою відповідати зусиллю 0 Н.
2. Встановлюється максимальне значення зусилля стискання F_{max} (Н), необхідне найбільше значення відносної деформації ϵ_{max} (%) і час паузи T (мс).
3. Далі індентор рівномірно і прямолінійно зі швидкістю 10 мм/с з верхньої точки починає опускатися вниз. При досягненні харчової маси зусилля на тензодатчику починає збільшуватися від 0 Н. Цей момент фіксується як початок процесу вимірювання. Після чого визначається товщина шару харчової маси X (мм) за умови, що робочий стіл відповідає початку координат 0 мм.
4. Під час процесу вимірювання визначається час t (мс), абсолютна деформація Δx (мм) і зусилля стискання F (Н).
5. Після досягнення значення абсолютної деформації $\Delta x \geq \epsilon_{\text{max}} \cdot X / 100$ (мм) або зусилля $F \geq F_{\text{max}}$ (Н) індентор зупиняється.
6. Далі індентор починає рухатися вгору рівномірно й прямолінійно зі швидкістю 10 мм/с. При цьому продовжується визначення значення часу t (мс), абсолютної деформації Δx (мм) і зусилля стискання F (Н).
7. Після досягнення верхньої точки індентор зупиняється і перебуває в стані спокою T (мс).

8. Далі процес вимірювання повторюється з п. 3 до п. 7. Усі отримані дані зберігаються в базі даних. Повторності припиняються в момент коли зусилля стиснення не змінюється. Таким чином, визначаються номінальна кількість повторів N. Приклад результатів вимірювання структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів наведений на рис. 4.1.
9. Далі на основі отриманих даних розраховуються структурно-механічні властивості харчових продуктів і кормів. Так, зусилля стиснення F (Н) перераховується в напруження σ (кПа) за формулою:

$$\sigma = \frac{F}{1000 \cdot S} = 2,887 \cdot F \quad (4.1)$$

і зберігаються в базі даних (рис. 4.1).

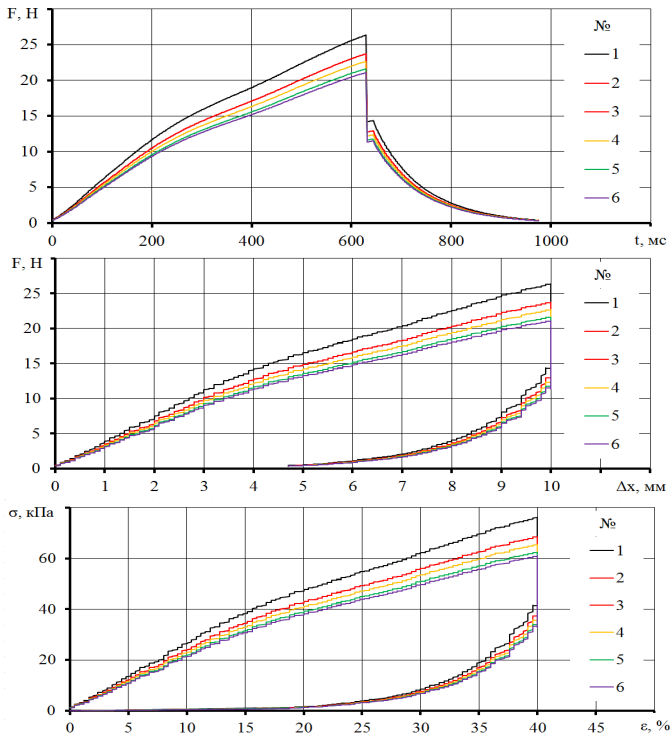


Рис. 4.1. Результати вимірювання структурно-механічних властивостей харчових продуктів

10. З бази даних обирається значення напруження при відносній деформації $\varepsilon = 25\%$ і фіксується (рис. 4.2) як одна зі структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів $\sigma(\varepsilon = 25\%)$.
11. Модуль пружності харчових продуктів і кормів E (кПа) визначається за формулою:

$$E = \frac{100 \cdot \sigma(\varepsilon = 25\%)}{25} = 4 \cdot \sigma(\varepsilon = 25\%). \quad (4.2)$$

12. На основі отриманих залежностей $\sigma(\varepsilon)$, які надаються у вигляді пружного гістерезису (див. рис. 4.1), визначаються їх площі (показник статичного гістерезису) S (кПа·%) за формулою (рис. 4.2) для кожного повтору

$$S = \sum_{i=1}^{\frac{\varepsilon_{\max}}{\Delta\varepsilon_i}} (\sigma_{\text{up } i} - \sigma_{\text{down } i}) \Delta\varepsilon_i = \sum_{i=1}^{10\varepsilon_{\max}} 0,1 (\sigma_{\text{up } i} - \sigma_{\text{down } i}). \quad (4.3)$$

13. Далі визначається показник динамічного гістерезису, як різниця площі статичного гістерезису ΔS (кПа·%) для 1-го і N -го повторення:

$$\Delta S = S_1 - S_N. \quad (4.4)$$

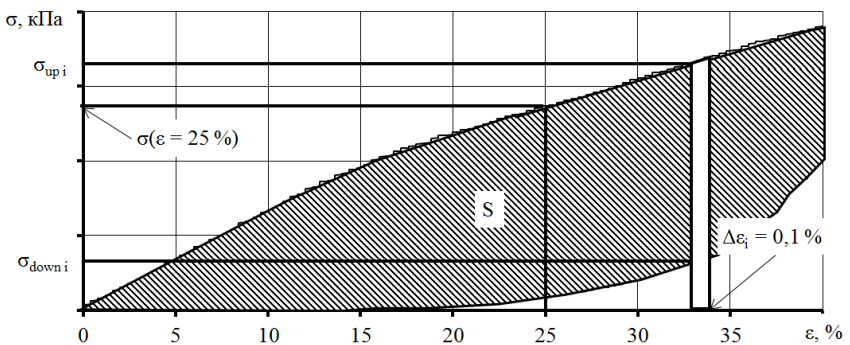


Рис. 4.2. Загальний вигляд залежності напруження харчових продуктів і кормів від її відносної деформації

4.2. Пристрій для визначення структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів

Автори: Алієв Е. Б., Миколенко С. Ю., Алієва О. Ю.

Відомий пенетрометр [174], який включає основу і вертикально встановлену на ній стійці, корпус, закріплений на стійці, індентор, прикріплений до штока, коромисло з пересувними гирями та розміщений у корпусі перпендикулярно штоку гвинт, гальмівний сухар і пружину, встановлені в корпусі співвідносно з гвинтом.

До недоліків відомого пенетрометра слід віднести відсутність можливості автоматичного виконання процесу вимірювання структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів та невисока точність вимірювання сили пружності, що впливає на значення дійсної величини пластичної міцності.

Відомий напівавтоматизований текстурометр для визначення структурно-механічних показників харчових продуктів [175]. Цей текстурометр включає корпус, на якому закріплені дві рифлені пластини, між якими закладається дослідний зразок, на верхню пластину з одного боку створюється постійне навантаження, а з іншого приєднано датчик лінійних переміщень, причому постійне навантаження створюється за допомогою нерівноплечого важеля з формою, що забезпечує плоскопаралельне переміщення верхньої пластини, який за допомогою гнучкого троса з'єднаний з верхньою пластиною, з іншого боку верхня пластина з'єднана з металевою пластиною, лінійне переміщення якої реєструється з високою точністю датчиком, що розташований горизонтально відносно площини текстурометра. Отримані значення передаються до персонального комп'ютера за допомогою розробленого програмного забезпечення з наступним їх аналізом та обробкою в реальному часі.

Недоліками відомого текстурометра є невиправдана складність конструкції, недостатня точність вимірювання, неповна автоматизація процесу вимірювання. Окрім того, в пристрої конструктивно не реалізована можливість визначення показників статичного й динамічного гістерезису пружності.

Пристрій для автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів наведено на рис. 4.3. Він являє собою станину 1, на якій жорстко встановлені напрямна 2, робочий стіл 3, корпус 4. У корпусі 4 розміщено блок живлення 5,

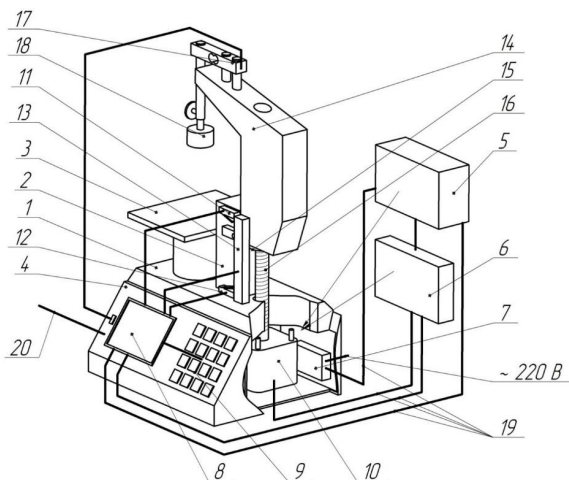


Рис. 4.3. Конструктивно-технологічна схема пристрою для автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів

драйвер крокового двигуна 6, розетка з вимикачем 7, блок керування з LCD-дисплеєм 8, клавіатура 9 і кроковий двигун 10. Кроковий двигун 10 жорстко закріплено до нижньої частини станини 1. На напрямній 2 закріплено верхній кінцевий вимикач 11, нижній кінцевий вимикач 12 і лінійний змінний резистор 13. На напрямну 2 встановлено штатив 14 з можливістю переміщення у вертикальній площині. На штативі 14 знизу жорстко закріплена гайка з біговими доріжками для кульок 15. До вала крокового двигуна 10 жорстко закріплено один край різьбового вала 16, який входить до гайки з біговими доріжками для кульок 15, утворюючи при цьому кулько-гвинтову передачу. Вільний язичок лінійного змінного резистора 13 закріплено до штатива 14. На верхній частині штатива 14 жорстко закріплено один край тензодатчика 17. До іншого краю тензодатчика 17 кріпиться індентор 18 циліндричної форми з можливістю легкої його заміни на інший. Блок живлення 5 за допомогою електричних проводів 19 приєднано до розетки із вимикачем 7, яка своєю чергою підключається до електричної мережі (~ 220 В). Драйвер крокового двигуна 6 і блок керування із LCD-дисплеєм 8 за допомогою електричних проводів 19 приєднано до блоку живлення 5. Кроковий двигун 10 і блок керування з LCD-дисплеєм 8 за допомогою електричних проводів 19 приєднано до драйвера крокового двигуна 6. Тензодатчик 17, верхній кінцевий вимикач 11,

нижній кінцевий вимикач 12 і лінійний змінний резистор 13 за допомогою електричних проводів 19 приєднано до блока керування з LCD-дисплеєм 8. Блок керування із LCD-дисплеєм 8 має USB-вихід 20 для підключення до персонального комп'ютера.

Загальний вигляд пристрою для автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів приведено на рис. 4.4.

Пристрій для автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів працює так.

Перед початком роботи оператор встановлює пристрій для автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів на рівну горизонтальну поверхню так, щоб поверхня робочого стола 3 розташовувалася горизонтально. При цьому станина 1 і корпус 4 не повинні піддаватися зовнішнім вібраціям. Далі оператор вмикає пристрій для автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів шляхом підключення розетки з вимикачем 7 до електричної мережі (~ 220 В) та переведенням вимикача в положення «ввімкнено». Тим самим напруга подається на блок живлення 5, який живить драйвер крокового двигуна 6 і блок керування з LCD-дисплеєм 8 за допомогою електричних проводів 19.



Рис. 4.4. Загальний вигляд пристрою для автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів

Далі оператор проводить калібрування тензодатчика 17, використовуючи еталонну гирю (похибка 0,1 г), лінійний змінний резистор 13 і штангенциркуль (похибка 0,01 мм). За допомогою клавіатури 9, оператор вводить дані щодо максимального значення зусилля стискання F_{\max} (Н), необхідного найбільшого значення відносної деформації ϵ_{\max} (%) і часу паузи T (мс), які зберігаються в пам'яті блока керування з LCD-дисплеєм 8. Після цього оператор встановлює харчову масу на поверхню робочого стола 3 і запускає процес вимірювання.

Блок керування з LCD-дисплеєм 8 за допомогою електричних проводів 19 передає сигнал до драйвера крокового двигуна 6, який своєю чергою вмикає кроковий двигун 10. Вал крокового двигуна 10 приводить в дію різьбовий вал 16, який обертається в бік протилежний навівці різьби різьбового вала 16. Тим самим гайка із біговими доріжками для кульок 15 починає викручуватися, піднімаючи штатив 14 разом з тензодатчиком 17 та індентором 18 вздовж напрямної 2. Після того як вільний язичок лінійного змінного резистора 13 досягне верхнього кінцевого вимикача 11, сигнал з останнього за допомогою електричних проводів 19 передається до блока керування з LCD-дисплеєм 8. Блок керування із LCD-дисплеєм 8 за допомогою електричних проводів 19 передає сигнал до драйвера крокового двигуна 6, який зупиняє кроковий двигун 10, – індентор 18 займає крайню верхню точку.

Далі блок керування з LCD-дисплеєм 8 за допомогою електричних проводів 19 передає сигнал до драйвера крокового двигуна 6, який своєю чергою вмикає кроковий двигун 10. Вал крокового двигуна 10 приводить в дію різьбовий вал 16, який обертається в бік навівки різьби різьбового вала 16. Тим самим гайка з біговими доріжками для кульок 15 починає накручуватися, опускаючи штатив 14 разом з тензодатчиком 17 та індентором 18 вздовж напрямної 2. Швидкість руху індентора 18 є рівномірною і становить 10 мм/с. Під час руху штатива 14 дані з тензодатчика 17 і лінійного змінного резистора 13 за допомогою електричних проводів 19 передаються до блока керування із LCD-дисплеєм 8.

При досягненні харчової маси зусилля на тензодатчику 17 починає збільшуватися від 0 Н. Цей момент фіксується блоком керування з LCD-дисплеєм 8 як початок процесу вимірювання. Після чого за допомогою лінійного змінного резистора 13 визначається значення товщини шару харчової маси X (мм) за умови, що робочий стіл відповідає початку координат 0 мм. Під час процесу вимірювання

визначається час t (мс) за даними внутрішнього годинника блока керування з LCD-дисплеєм 8, абсолютна деформація Δx (мм) за даними лінійного змінного резистора 13 і зусилля стискання F (Н) за даними тензодатчика 17.

Після досягнення значення абсолютної деформації $\Delta x \geq \epsilon_{\max} \cdot X/100$ (мм) або зусилля $F \geq F_{\max}$ (Н) блок керування з LCD-дисплеєм 8 за допомогою електричних проводів 19 передає сигнал до драйвера крокового двигуна 6, який зупиняє кроковий двигун 10, тим самим зупиняючи переміщення індентора 18.

У разі досягнення вільним язичком лінійного змінного резистора 13 нижнього кінцевого вимикача 12 сигнал з останнього за допомогою електричних проводів 19 передається до блока керування з LCD-дисплеєм 8. Блок керування з LCD-дисплеєм 8 за допомогою електричних проводів 19 передає сигнал до драйвера крокового двигуна 6, який зупиняє кроковий двигун 10, – індентор 18 займає крайню нижню точку.

Далі блок керування з LCD-дисплеєм 8 за допомогою електричних проводів 19 передає сигнал до драйвера крокового двигуна 6, який своєю чергою вмикає кроковий двигун 10. Вал крокового двигуна 10 приводить в дію різьбовий вал 16, який обертається в бік протилежний навивці різьби різьбового вала 16. Тим самим гайка з біговими доріжками для кульок 15 починає викручуватися, піднімаючи штатив 14 разом з тензодатчиком 17 та індентором 18 вздовж напрямної 2. Швидкість руху індентора 18 є рівномірною і становить 10 мм/с. Під час руху штатива 14 дані з тензодатчика 17 і лінійного змінного резистора 13 за допомогою електричних проводів 19 передаються до блока керування з LCD-дисплеєм 8.

Далі індентор 18 починає рухатися вгору вздовж напрямної 2 рівномірно й прямолінійно зі швидкістю 10 мм/с. Під час процесу вимірювання визначається час t (мс) за даними внутрішнього годинника блока керування з LCD-дисплеєм 8, абсолютна деформація Δx (мм) за даними лінійного змінного резистора 13 і зусилля стискання F (Н) за даними тензодатчика 17.

Після досягнення вільним язичком лінійного змінного резистора 13 верхнього кінцевого вимикача 11, сигнал з останнього за допомогою електричних проводів 19 передається до блока керування із LCD-дисплеєм 8. Блок керування з LCD-дисплеєм 8 за допомогою електричних проводів 19 передає сигнал до драйвера крокового

двигуна 6, який зупиняє кроковий двигун 10, – індентор 18 займає крайню верхню точку.

Далі штатив 14 з тензодатчиком 17 і індентором 18 перебуває в стані спокою – час паузи T (мс). Після цього вищезазначені операції повторюються. Повторності припиняються в момент, коли зусилля стиснення не змінюється. Таким чином, визначаються номінальна кількість повторів N .

Усі отримані дані зберігаються в базі даних блока керування з LCD-дисплеєм 8 і передаються через USB-вихід 20 до персонального комп'ютера.

Далі на основі отриманих даних розраховуються структурно-механічні властивості харчових продуктів і кормів відповідно до п. 9 – п. 13 способу автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів.

Таким чином, запропонований спосіб вимірювання структурно-механічних (або реологічних) властивостей харчових продуктів і кормів та пристрій для його здійснення дозволяє зберегти точність індивідуального вимірювання, що відповідає сучасним вимірювальним засобам та забезпечує низьку трудомісткість і високу технологічність. Крім того, запропонований спосіб вимірювання і пристрій для його здійснення дозволяють визначати силу пружності, модуль пружності, показники статичного й динамічного гістерезису пружності, що неможливо виконати за допомогою безпосереднього вимірювання, чим підвищується загальна продуктивність дослідження. При цьому також значною мірою виключається вплив людського фактора на точність вимірювання структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів.

4.3. Методика лабораторних досліджень з визначення фізико-механічних властивостей зернової сировини

Автори: Лупко К.О.

Формування моделей та емпіричних математичних закономірностей, встановлення раціональних конструктивно-режимних параметрів робочих органів обладнання неможливе без встановлення таких морфологічних, фізико-механічних і реологічних власти-

востей насіння: геометричні розміри зернової сировини, маса 1000 зернин, дійсна щільність зернової сировини, коефіцієнт тертя спокою зернової сировини об різні поверхні, коефіцієнт тертя зернової сировини між собою, коефіцієнт Пуассона, модуль Юнга, коефіцієнт відновлення, швидкість витання тощо.

Розмірні характеристики випадково обраних 100 зернин визначаються за діаметром кожної зернини D_p . Вимірювання проводилися за допомогою стрілочного індикатора SATRA з точністю до 0,01 мм (рис. 4.5).

Маса 1000 зернин визначається шляхом випадкового вибору 1000 зернин на лічильнику зерна і насіння Contador та зважування на електронних вагах METRINCO AB224 чутливістю 0,001 г (рис. 4.6).

Дійсна щільність (ρ_r) визначається методом витіснення гліцерином, а саме шляхом заповнення кубічного контейнера відомого об'єму (100 мм × 100 мм × 100 мм) і зважування на електронних вагах [176–179].

Коефіцієнт тертя спокою насіння об різні поверхні f визначається для сталі, ABS пластика тощо. Шорсткість поверхні визначається з використанням профілометра TR100 (рис. 4.7, а). Для вимірювання коефіцієнта тертя спокою один кінець поверхні тертя був прикріплений до гвинта, інший містився на горизонтальній поверхні (рис. 4.7, б).

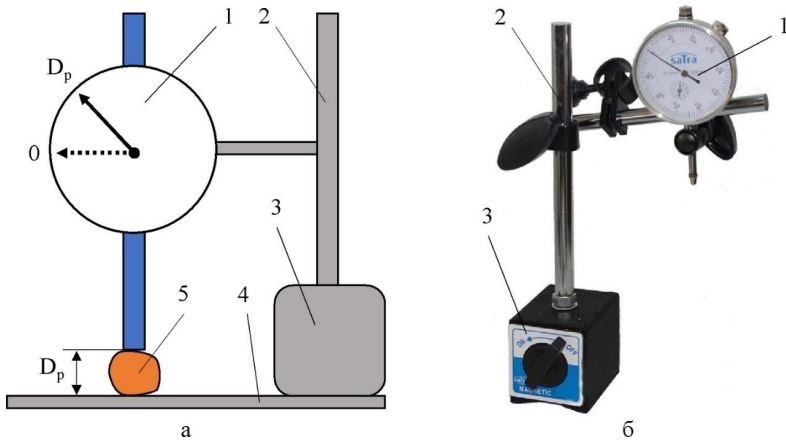


Рисунок 4.5 – Обладнання для вимірювання геометричних розмірів зерна:
 а – схема; б – загальний вигляд; 1 – стрілочний індикатор; 2 – штатив;
 3 – магнітна основа; 4 – плоский стіл; 5 – насінина



а

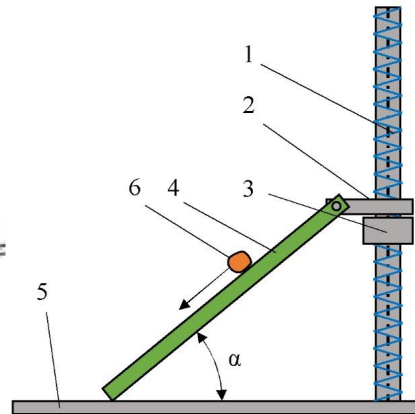


б

Рис. 4.6. Загальний вигляд лічильника зерна Contador (а) й електронних ваг METRINCO AB224 (б)



а



б

Рис. 4.7. Загальний вигляд профілометра TR100 (а) і схема обладнання для вимірювання коефіцієнта тертя спокою насіння об різні поверхні (б):
 1 – гвинт; 2 – пластина з отвором; 3 – гайка; 4 – поверхня тертя;
 5 – горизонтальна поверхня; 6 – насінина

Зернини клали на поверхню тертя, один кінець якої поступово піднімався за допомогою гвинта. Тангенс кута α (рис. 4.7, б), при якому зернина починала ковзати поверхнею, й визначав статичний коефіцієнт тертя спокою насіння об поверхню [180].

Коефіцієнт тертя насінин між собою визначається з використанням спеціалізованого обладнання так (рис. 4.8) [181]. У контейнер

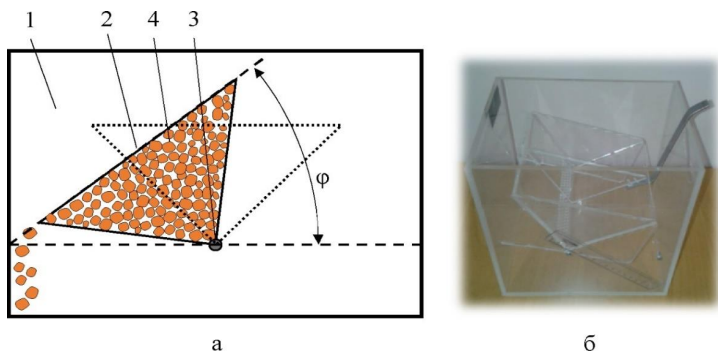


Рис. 4.8. Схема (а) і загальний вигляд (б) обладнання для вимірювання коефіцієнта тертя насінин між собою: 1 – контейнер у формі прямокутного паралелепіпеда; 2 – контейнер у формі трикутної призми; 3 – вал; 4 – насіння

у формі трикутної призми (кут при вершині основи 90°), який у початковий момент часу розміщувався горизонтально до основи, засипали насіння до самого верху без утворення гірки. Далі, обертаючи контейнер у формі трикутної призми навколо вершини, фіксується момент, коли насінини починають скочуватися до контейнера у формі прямокутного паралелепіпеда. Тангенс кута нахилу φ (рис. 4.8) і є коефіцієнтом тертя насінин між собою.

Коефіцієнт Пуассона і модуль Юнга визначається з використанням пристрою, який описано в розділі 4.2. Після розміщення зерна на робочому столі й запуску вимірювання, пристрій в автоматичному режимі здавлює насінину індентором і розраховує коефіцієнт Пуассона і модуль Юнга.

Коефіцієнт відновлювання насіння – це додатне дійсне число між 0 і 1, що дорівнює співвідношенню швидкостей до і після зіткнення зернини з поверхнею, взятих уздовж лінії зіткнення. Зернини, для яких $C_R = 1$, зіштовхуються пружно, а насінини з $C_R < 1$ зіштовхуються непружно. Для $C_R = 0$ зернина насправді «зупиняється» після удару зовсім без відскоку [182]. У випадку коли силами тертя можна знехтувати і зернина впала зі стану спокою на горизонтальну поверхню коефіцієнт відновлювання зернини можна розрахувати так (рис. 4.9)

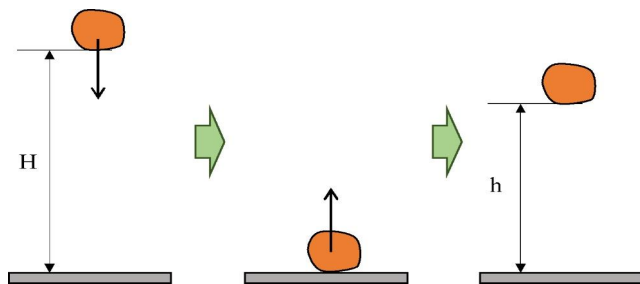


Рис. 4.9. Процес вимірювання висоти відскоку й падіння

$$C_R = \sqrt{\frac{h}{H}}; \quad (4.5)$$

де h – висота відскоку, м;

H – висота падіння, м.

Висоти відскоку й падіння фіксували з використанням камери з максимальною частотою кадрів – 240 fps.

Швидкість потоку повітря, при якій зернина перебуває в підвішеному стані, є швидкість витання. На випробувальному стенді (рис. 4.10), розробленому Е. Б. Алієвим [140], вимірюється швидкість витання зерна.

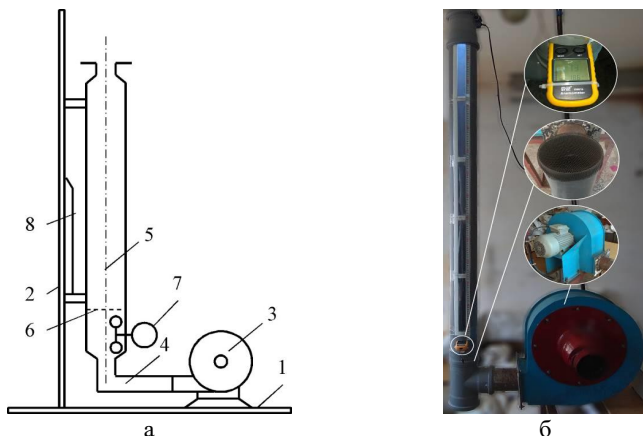


Рисунок 4.10 – Принципова схема (а) і загальний вигляд (б) стенду для визначення швидкості витання часток: 1 – станина; 2 – стійка; 3 – повітродувна машина; 4 – фітинг; 5 – труба; 6 – сітка; 7 – анемометр GM816; 8 – шкала

На станині 1 жорстко встановлена вертикальна стійка 2 і повітродувна машина 3 з регульованою заслінкою. Фітинг 4 з'єднує повітродувну машину й вертикальну трубу 5, в нижній частині якої встановлена сітка 6. Швидкість повітря вимірюється анемометром GM816 7, висота підйому частинок – шкалою 8. На сітці вертикальної труби містився шар насіння товщиною 3–5 мм. Після включення електродвигуна повітродувної машини, частота обертання ротора плавно підвищувалася. Швидкість витання визначалася за висотою підйому частинок. Коли приблизно 95 % частинок шару піднімалися в просторі труби, зчитувалися показання анемометра. Досліджувалися різні фракції попередньо розділеного за розмірами матеріалу.

ВИСНОВКИ

1. В результаті маркетингового аналізу встановлено обмеженість сегмента харчових продуктів з підвищеною біологічною цінністю на українському ринку через відсутність науково-теоретичного обґрунтування технологічних процесів зберігання, комплексної перероблення біологічно цінної рослинної сировини і технології виробництва харчових продуктів.
2. Розроблено класифікацію технологій отримання біологічно цінних харчових продуктів і кормових добавок за критеріями: вид вихідної сировини; визначальний метод обробки; вид (тип) кінцевої продукції та її призначення. Доведено, що насіння промислових конопель, зерно амаранта, сорго й соризу належать до потенційно безвідходної і безглютенової сировини харчових виробництв.
3. На основі встановлених високих технологічних якостей продуктів перероблення визначено напрями використання насіння промислових конопель (олія, у складі кексів, печива, батончиків), зерна амаранта (олія, поп-амарант, у складі хліба, печива, батончиків), зерна сорго (поп-сорго, у складі хліба, печива, батончиків), зерна спельти (хліб, печиво), насіння льону (у складі хліба, печива, батончиків). Доведено, що диференціація біологічно цінної рослинної сировини за напрямом використання має проводитися з урахуванням факторів видових і сортових особливостей зерна й насіння. Для побічних продуктів перероблення й відходів більше мають враховуватися методи обробки сировини, що суттєво впливають на якість таких продуктів.
4. Проведено удосконалення технологічної лінії комплексної безвідходної перероблення відходів олійних культур у корми для органічного тваринництва. Враховуючи необхідність в отриманні як сухих, так і рідких кормів до технологічної лінії введено процеси гранулювання і кавітаційного диспергування, що дозволяє використовувати пропоновану технологічну лінію приготування кормів як універсальну.
5. За результатами аналізу розроблено конструктивно-технологічну схему мехатронної системи трієрного сепара-

ратора Відмінність запропонованої системи від традиційної полягає в тому, що фотокамера фіксує траєкторію польоту зерна. Ця інформація обробляється в блоці керування, який своєю чергою змінює частоту обертання мотор-редуктора і, як наслідок, барабана з чарунками, кут нахилу лотка, кут повороту заслінки з кроковим двигуном бункера-дозатора. Такі маніпуляції з режимними параметрами трієрного сепаратора дозволяють підлаштувати його до зміни складу насінневої суміші, тим самим підвищуючи якість сепарації. Окрім того, через автоматичне підлаштування режимних параметрів трієрного сепаратора участь оператора установки в процесі сепарації майже нівелюється, що зменшує трудові витрати.

6. Розроблено модель процесу сепарації зернового матеріалу на циліндричному чарунковому трієрі в програмному пакеті Star CCM+. Спираючись на фізико-механічні властивості зернового матеріалу, задані початкові й граничні умови циліндричного чарункового трієра, отримано візуалізацію процесу сепарації залежно від факторів досліджень (кількості зерна й домішок у зерновій суміші N_0 , частоти обертання циліндра трієра n і діаметра циліндра трієра D). За критерій продуктивності обрано кількість усіх компонентів зернової суміші N , які перебували в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора. За критерій оцінювання якості процесу сепарації прийнято відносний вміст домішок ϵ в зерновій суміші, яка перебувала в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндра трієрного сепаратора.
7. Розроблено конструкцію гвинтової установки для виготовлення кормових пелет з білкової фракції макухи насіння олійних культур у складі технологічної лінії. Оптимальними конструктивно-технологічними параметрами установки для виготовлення пелет є швидкість подачі матеріалу $q = 35,7$ кг/год, частота обертів робочого органа $n = 50,5$ об/хв, вологість білкової фракції $W = 28,9\%$. При цьому потужність установки $P = 973$ Вт, а її продуктивність $Q = 48$ кг/год.
8. Обґрунтовано конструктивно-технологічну схему роторного кавітаційного диспергатор-гомогенізатора. Наведені результати чисельного моделювання в програмному

пакеті Star CCM+ пропонуваного роторного кавітаційного диспергатор-гомогенізатора дозволяють стверджувати про наявність процесу кавітаційного диспергування і гомогенізації на основі отриманих розподілів і динаміки швидкостей переміщення рідкої фази суміші, тиску й концентрації газоподібної фази рідини в дифузорі. Це підтверджує працездатність конструктивно-технологічної схеми розробленого технічного засобу для приготування рідких кормів та свідчить про доцільність подальших його досліджень з обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів. Розроблено фізико-математичні моделі й отримано експериментальні закономірності процесу диспергування сільськогосподарської сировини рослинного походження. Обґрунтовано конструктивно-технологічні параметри кавітаційного диспергатор-гомогенізатора. Розроблено методику розрахунку параметрів кавітаційного диспергатор-гомогенізатора.

9. У результаті патентно-інформаційного аналізу встановлено, що економічні та харчові аспекти використання експандерів роблять їх використання зрозумілим і виправданим у кормовій галузі. Встановлено, що застосування експандерів у світовій комбікормовій промисловості з кожним роком зростає, що також відображається в ширшому асортименті нещодавно вироблених кормів для тварин. Проведено обґрунтування конструктивно-технологічної схеми експандера кормів. Набув подальшого розвитку фізико-математичний апарат руху твердих компонентів корму у гвинтовому каналі експандера, який покладено в основу методики чисельного моделювання процесу експандування кормів у програмному пакеті Star CCM+. Проведено попереднє чисельне моделювання процесу експандованого приготування кормів у програмному пакеті Star CCM+, що дає змогу визначати критеріями досліджень: тиск у порожнині між гвинтом і циліндром експандера, щільність отриманих експандатів, продуктивність експандера, векторне поле швидкостей компонентів кормів у гвинтовому каналі. Факторами досліджень слід обрати: подачу компонентів кормів, частоту обертання гвинта, діаметр, довжину і крок гвинта, а також коефіцієнт зміни кроку і глибини гвинта за його довжиною.

10. Виявлено основні напрями удосконалення конструктивних особливостей шнекових диспергаторів і визначальні технологічні параметри диспергування зернової сировини. У результаті теоретичних досліджень встановлено, що на переміщення продукту в шнеку диспергатора впливають такі фактори, як: сила тертя, вологість, стан поверхні й адгезійні властивості частинок матеріалу, що обробляється. Запропонована досить проста математична модель, що дозволяє визначити кінематичні характеристики руху зернової суміші в диспергаторі залежно від його конструктивних характеристик. Отримано диференціальне рівняння руху матеріалу, що описує перехідний режим під час пуску пристрою. Встановлені залежності дозволяють точніше врахувати особливості руху зернового матеріалу в диспергаторі відповідно до розробленої математичної моделі.
11. Удосконалено методику аналізу структурно-механічних властивостей харчових мас й обґрунтовано спосіб їх автоматичного визначення і пристрій для цього. Запропонований спосіб і пристрій зберігає точність індивідуального вимірювання структурно-механічних (або реологічних) властивостей харчових продуктів і кормів, що відповідає сучасним вимірювальним засобам, та забезпечує низьку трудомісткість і високу технологічність. Крім того, запропонований спосіб і пристрій дозволяють визначати силу пружності, модуль пружності, показники статичного й динамічного гістерезису пружності, що неможливо виконати за допомогою безпосереднього вимірювання, а отже, підвищується загальна продуктивність дослідження. При цьому також значною мірою зникає вплив людського фактора на точність вимірювання структурно-механічних властивостей харчових продуктів і кормів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Безугла Л. С. Маркетинговий аналіз плодоовочевого ринку в контексті виробництва біологічно цінних харчових продуктів. *Економічний простір*: збірник наукових праць. 2020. № 154. С. 31–35. URL: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/154-5>.
2. Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 08.04.2020).
3. Баланси та споживання основних продуктів харчування населенням України 2020: статистичний збірник. Київ: Державний комітет статистики України, 2020. 59 с.
4. Українські виробники овочів і фруктів представляють свою продукцію на FRUIT LOGISTICA 2020. Інноваційний ресурс для професіоналів плодоовочевого бізнесу: вебсайт. URL: <https://www.profihort.com/2020/02/ukraïnski-virobniki-ovochiv-i-fruktiv-predstavlyayut-svoyu-produkciyu-na-fruit-logistica-2020/> (дата звернення: 09.04.2020).
5. Чичкало-Кондрацька І. Б., Новицька І. В. Світовий досвід просування органічної продукції. *Ефективна економіка*. 2018. № 2. URL: <http://www.economy.nauka.com.ua/?op=1&z=6104> (дата звернення: 09.04.2020).
6. Оприлюднено рейтинг областей за кількістю виробників органічної продукції. Супер агроном: вебсайт. URL: <https://superagronom.com/news/8629-oprilyudneno-reyting-oblastey-za-kilkisty-virobnikiv-organichnih-ovochiv-ta-yagid> (дата звернення: 09.04.2020).
7. Безугла Л. С. Місце України у виробництві та реалізації рослинної сировини для біологічно цінних харчових продуктів серед країн світу. *Інвестиції: практика та досвід*. 2020. № 15–16. С. 51–56. URL: [10.32702/2306-6814.2020.15-16.51](https://doi.org/10.32702/2306-6814.2020.15-16.51).
8. Boutin A. Sur la presence d'une proportion considerable de nitre dans L' *Amaranthus blitum*. *Comp. Rend.* 1873. V. 76. P. 413–417.
9. Амарантова хвиля: в Україні зростають площі під посівами амаранту. *AgroDay*: вебсайт. URL: <https://agroday.com.ua/2019/10/30/amarantova-hvylya-v-ukrayini-zrostayut-ploshhi-pid-posivamy-amaratnu/> (дата звернення: 06.02.2021).
10. Миколенко С. Ю., Захаренко А. А. Дослідження впливу амарантового та льняного борошна на якість печива. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 228–240.
11. Марченко Ж. Ю. Напрями використання коноплепродукції у світі. *Луб'яні та технічні культури*: збірник наукових праць. 2015. № 4(9). С. 159–166.
12. Примаков О. А., Маринченко І. О. Технічні коноплі – перспективи розвитку культури. *Технічні культури: інноваційні напрями досліджень*: матеріали наук.-практ. конф. молодих вчених (Глухів, 17–19 жовт. 2012 р.). Харків: ДСЛК ІСГ Північного Сходу НААН, 2013. С. 145–150.
13. Johnson R. Hempasan Agricultural Commodity. *Congressional Research Service. Congressional Research Digital Collection*. 2018. URL: <https://fas.org/sgp/crs/misc/RL32725.pdf> (дата звернення: 05.02.2021).

14. В Україні площі посівів технічних конопель продовжують зменшуватися. *Agravery*: вебсайт. URL: <https://agravery.com/uk/posts/show/v-ukraini-plosi-posiviv-tehnicnih-konopel-prodovzuut-zmensuvatisa> (дата звернення: 04.02.2021).
15. Ринок сорго в Україні та світі. *Агробізнес сьогодні*: вебсайт. URL: <http://agro-business.com.ua/agro/ekonomichnyi-hektar/item/7839-rynok-sorho-v-ukraini-ta-sviti.html> (дата звернення: 05.02.2021).
16. Farinon B., Molinari R., Costantini L., Merendino N. The seed of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.): nutritional quality and potential functionality for human health and nutrition. *Nutrients*. 2020. Vol. 12. P. 1935–1994.
17. Devi V., Khanam S. Comparative study of different extraction processes for hemp (*Cannabis sativa*) seed oil considering physical, chemical and industrial-scale economic aspects. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 207. P. 645–657.
18. Осокіна Н. М., Герасимчук О. П., Матвієнко Н. П. Технологія зберігання та переробки зерна. Київ: Книга-плюс, 2012. 320 с.
19. Могилянська Н. О. Сучасний стан і перспективи переробки насіння олійних культур. *Зернові продукти і комбікорми*. 2014. № 1(53). С. 22–25.
20. Осейко М. І. Технологія рослинних олій. Київ: Варта, 2006. 280 с.
21. 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.
22. Сова Н. А., Войтанішек Д. І., Луценко М. В., Петраченко Д. О. Особливості післязбиральної обробки насіння промислових конопель. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2019. № 1(68). С. 129–135.
23. Сова Н. А., Луценко М. В., Лобанова А. О., Грекова Н. В. Використання конопляної олії в технології майонезу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2019. № 5(1330). С. 152–159.
24. Шацкий В. В. Моделирование механизированных процессов приготовления кормов. Запорожье: Х-ПРЕСС, 1998. 139 с.
25. Черновол М., Свірень М., Кісільов Р. Приготування кормових сумішей комбінованим змішувачем. *Вісник аграрної науки*. 2018. № 2 (779). С. 54–59. URL: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201802-09>.
26. Зайцев В. В., Константинов В. А., Корнилова В. А. Эффективность использования экструдированных комбикормов-концентратов в кормлении коров. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2015. № 10(41), ч. 3. С. 28–31. URL: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2015.41.097>.
27. Chalaya O., Nanka A., Paliy A., Nagornij N., Chalyi O. Study of quality indicators for meat raw materials and the effectiveness of a protective technological method under conditions of different content of heavy metals in a pig diet. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol 4, № 11 (100). P 74–81. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174154>.

28. Рижій, сафлор, кунжут. Стратегія виробництва олійної сировини в Україні (малопоширені культури) / І. А. Шевченко, О. І. Поляков, К. В. Ведмедева, І. Б. Комарова. Запоріжжя: СТАТУС, 2017. 40 с.
29. Льон олійний, гірчиця. Стратегія виробництва олійної сировини в Україні (малопоширені культури) / Шевченко І. А., Лях В. О., Поляков О. І. та ін. Запоріжжя: СТАТУС, 2017. 44 с.
30. Алієв Е. Б., Пацула О. М., Гриценко В. Т. Технологія комплексної безвідхідної переробки макухи з насіння олійних культур з одержанням високоякісних повноцінних протеїнових добавок у вигляді пелет та твердого біопалива: науково-методичні рекомендації. Запоріжжя: СТАТУС, 2017. 96 с.
31. Скрыль И. И., Ковальчук А. Н. Кавитационная технология и оборудование для производства жидких кормов. *Проблемы современной аграрной науки: материалы междунар. заочной науч. конф.*, 15 октября 2011 г. Красноярск: КГАУ, 2011.
32. Bykov A. V., Kvan O. V., Sizentsov A. N., Mezhueva L. V., Rusaeva M. L., Sizentsov Y. A. Development of the technology of receiving fodder products on the basis of ultrasonic impact on cellulose containing and fatty waste. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2018. № 80(3). P. 236–242. URL: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-3-236-242>.
33. Шевченко І. А., Павліченко В. М., Лиходід В. В., Забудченко В. М. Аналіз конструкцій технічних засобів для виробництва високозасвоюваних кормів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвідом. наук.-техн. зб. КНТУ. Кіровоград: КНТУ, 2013. № 43, ч. 1. С. 179–184.*
34. Павліченко В. М., Троїцька О. О., Лиходід В. В. Обґрунтування техніко-технологічних основ енергоощадного виробництва кормової добавки на основі рослинної сировини. *Механізація, екологізація та конвертація біосировини в тваринництві: зб. наук. праць. Запоріжжя, 2012. № 1 (9). С. 10–21.*
35. Обґрунтування оптимальних режимів роботи удосконаленого зразка роторно-кавітаційного диспергатора при подрібненні рослинних кормів. Павліченко В. М., Лиходід В. В., Луц П. М., та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвідом. наук.-техн. зб. КНТУ. Кіровоград: КНТУ, 2014. № 44, ч. 1. С. 252–258.*
36. Алієв Е. Б. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. 2019. 196 с.
37. Shevchenko I., Aliiev E. Precise grading and sorting of sunflower plant materials in industrial facilities. *Journal of Central European Agriculture*. 2022. № 23(2). P. 327–341. URL: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/23.2.3345>.
38. Shevchenko I., Aliiev E., Viselga G., Kaminski J. R. Modeling separation process for sunflower seed mixture on vibro-pneumatic separators. *Mechanika*. 2021. № 27(4). P. 311–320. URL: <https://doi.org/10.5755/j02.mech.27647>.

39. Broas P. Advantages and problems of CAVE-visualisation for design purposes. *Trans: VTT Symposium Virtual prototyping* (Espoo, Finland, February 1, 2001). 2001. P. 73–81.
40. Bai C. Modelling of spray impingement processes: *Ph.D Thesis. University of London*. 1996.
41. Kubicki D., Lo S. Slurry transport in a pipeline – comparison of CFD and DEM models. *The minerals and process industries: ninth International Conference on CFD* (CSIRO, Melbourne, Australia, 10–12 December 2012). Melbourne, 2012. P. 1–6.
42. Han S. W., Lee W. J., Lee S. J. Study on the particle removal efficiency of multi inner stage cyclone by CFD simulation. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2012. Vol. 6. P. 411–415.
43. Satish G., Ashok Kumar K., Vara Prasad V., Pasha Sk. M. Comparison of flow analysis of a sudden and gradual change of pipe diameter using fluent software. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2013. Vol. 2. P. 41–45.
44. Iguchi M., Ilegbusi O. J. Basic transport phenomena in materials engineering. Tokyo: Springer, 2014. 260 p.
45. Иванец В. Н., Бакин И. А., Белоусов Г. Н. Энтропийный подход к оценке процесса смешивания сыпучих материалов. *Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья*. 2002. № 11. С. 16–18.
46. Бакин И. А., Белоусов Г. Н., Саблинский А. И. Моделирование процесса смешивания энтропийно – информационным методом. *Новые технологии в научных исследованиях в образовании: материалы Всерос. науч.-практ. конф.*. Юрга, 2001. Ч. 1.
47. Aliiev E., Lupko K. Prerequisites for the creation of a mechatronic system of indented cylinders for the separation of fine seeds. *Scientific Horizons*. 2021. № 24(3). P. 75–86. URL: [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(3\).2021.75-86](https://doi.org/10.48077/scihor.24(3).2021.75-86).
48. Алієв Е. Б., Лупко К. О. Застосування трієрних сепараторів для очищення насіння дрібнонасінневих культур. *Сучасні проблеми землеробської механіки: матеріали XXI Міжнар. наук. конф. Харків: ХНТУСГ*, 2020. С. 116.
49. Bai C., Gosman A. D. Development of methodology for spray impingement simulation. *SAE Technical Paper Series*. 1995. 21 p. URL: <https://doi.org/10.4271/950283>
50. Saqr K. M., Aly H. S., Wahid M. A., Sies M. M. Numerical simulation of confined vortex flow using a modified k-ε turbulence model. *CFD Letters*. 2009. Vol. 1(2). P. 87–94.
51. Wallin S. Engineering turbulence modeling for CFD with a focus on explicit algebraic reynoldce stress models: doctoral thesis. Stockholm, Sweden: Norstedts Tryckeri, 2000. 124 p.
52. Алієв Е. Б., Лупко К. О. Морфологічні ознаки і фізико-механічні властивості насіння дрібнонасінних культур. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2020. № 50. С. 27–35. URL: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.27-35>.

53. Алієв Е. Б., Лупко К. О., Белка О. В., Алієва О. Ю. Трієрний сепаратор насінневого матеріалу дрібнонасінневих олійних культур. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2021. № 31. С. 118–132. URL: <https://doi.org/10.36710/ioc-2021-31-11>.
54. Алієв Е. Б., Лупко К. О. Результати симуляції процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на циліндричному чарунковому трієрі при змінній частоті обертання. *Сучасні напрями та досягнення селекції і насінництва сільськогосподарських культур*: матеріали наук.-практ. інтернет-конф. Полтава, 2022. С. 135–137.
55. Алієв Е. Б., Лупко К. О., Долгих Д. О. Фізико-математична модель взаємодії компонентів насінневої суміші дрібнонасінневих олійних культур із робочим органом трієра. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2022. № 32. С. 123–131.
56. Aliiev E., Lupko K. Results of numerical modelling of the process of separation of seed material of small-seeded crops on a cylindrical cell trie. *Machinery & Energetics*. 2022. Vol. 13, № 2. P. 9–19. URL: <https://doi.org/10.31548/machenergy2022.01.009>
57. Политруб. *Politraude*: вебсайт. URL: <http://www.politraude.com.ua>. (дата звернення: 20.05.2014).
58. АгроГрупп. *Borex*: вебсайт. URL: <http://www.borex.com.ua>. (дата звернення: 20.05.2014).
59. Артмаш. *Tokrab*: вебсайт. URL: <http://www.tokrab.com.ua> (дата звернення: 20.05.2014).
60. ЧП БизнесСтрой – Производственное предприятие предлагает оборудование для строительства. *Biznesstroy*: вебсайт. URL: <http://www.biznesstroy.com.ua>. (дата звернення: 20.05.2014).
61. Фора-Запад – оборудование для производства биотоплива для организаций разных масштабов купить в Москве. *fora-zakhid*: вебсайт. URL: <http://www.fora-zakhid.com.ua>. (дата звернення: 20.05.2014).
62. KLZ, ООО в Рокитне | Интернет-магазин KLZ. *KLZ*: вебсайт. URL: <http://138392.ua.all.biz>. (дата звернення: 20.05.2014).
63. ЗАО «УкрСтройДом». *Ukrstroydom*: вебсайт. URL: <http://www.ukrstroydom.com.ua/contact.html>. (дата звернення: 20.05.2014).
64. АгроВектор – Агро торговая площадка Украины: товары, услуги сельского хозяйства и промышленности.–: вебсайт. URL: <http://www.agrovektor.com/index.php> (дата звернення: 20.05.2014).
65. Sota Stal, NPF в Київ | Интернет-магазин. *Sota Stal, NPF*: вебсайт. URL: <http://www.167125.ua.all.biz>. (дата звернення: 20.05.2014).
66. ЧАО Електромотор Полтава. *Elmotor*: вебсайт. URL: <http://www.elmotor.com.ua> (дата звернення: 20.05.2014).
67. Все блоки. *Vsebloki*: вебсайт <http://www.vsebloki.com.ua>. (дата звернення 20.05.2014).

68. Гранулятор. Оборудование для переработки С/Х продукции и строительства. *Garantagro*: вебсайт. URL: <http://www.garantagro.com/content/36> (дата обращения: 20.05.2014).
69. Интернет-магазин Lavrin. ChP: вебсайт. URL: <http://www.lavrin.all.biz>. (дата звернення: 20.05.2014).
70. Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф. Планирование эксперимента: учеб. пособие. Минск: БГУ, 1982. 302 с.
71. Мельников В. В., Алёшкин В. Р., Рощин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Ленинград: Колос, 1972. 194 с.
72. Калоша В. К., Лобко С. И., Чикова Т. С. Математическая обработка результатов эксперимента. Минск: Высшая школа, 1982. 103 с.
73. ДСТУ 3973–2000. Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Правила виконання науково-дослідних робіт. [Чинний від 2000–11–27]. Київ: Держстандарт України, 2001. 20 с.
74. ДСТУ 3008–95. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. [Чинний від 1995–02–23]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України 1995. 38 с.
75. ГОСТ 27548–97. Корма растительные. Методы определения содержания влаги. [Действительный от 1999–01–01]. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1998. 10 с.
76. ГОСТ 13496.15–97. Корма, комбикорма, комбикормовое сырьё. Методы определения содержания сырого жира. [Действительный от 1997–01–01]. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1997. 12 с.
77. ДСТУ 7169: 2010. Корми, комбікорми, комбікормова сировина. Методи визначення вмісту азоту і сирового протеїну. [Чинний від 2011–07–01]. Київ: Держстандарт України, 2011. 38 с.
78. Методики исследований в животноводстве / Эйснер Ф. Ф. (отв. ред.), Виноградский А. И., Гавриш В. К. и др. Киев: Урожай, 1965. С. 102–132.
79. Алієв Е. Б., Пацула О. М., Гриценко В. Т. Технологія комплексної безвідхідної переробки макухи з насіння олійних культур з одержанням високоякісних повноцінних протеїнових добавок у вигляді пелет та твердого біопалива: науково-методичні рекомендації. Запоріжжя: СТАТУС, 2017. 96 с.
80. Алієв Е. Б., Пацула О. М. Результати експериментальних досліджень макетної установки для виготовлення пелет з білкової фракції макух насіння олійних культур. Технічні системи і технології тваринництва. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Харків. 2015. № 157. С. 222–226.
81. Алієв Е. Б., Пацула О. М., Кутіщев В. Л. Методика експериментальних досліджень установки для виготовлення пелет з білкової фракції макухи насіння олійних культур. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природовикористання України*. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. № 212, ч. 2. С. 63–69.

82. Алієв Е. Б. Результати експериментальних досліджень конструктивно-технологічних параметрів установки для виготовлення пелет. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2015. № 3 (92). С. 79–83.
83. Алієв Е. Б., Лабатюк Ю. М., Пацула О. М. Визначення конструктивних параметрів формуючих кулачків установки для виготовлення пелет. *Вісник Степу: наук. зб. Кіровоград: КОД*, 2016. № 13. С. 125–128. ISBN 978–617–653–010–7.
84. Алієв Е. Б., Пацула О. М. Результати експериментальних досліджень технологічного процесу формування пелет з білкового порошку. *Технології АПК XXI століття: проблеми і перспективи розвитку*: зб. матеріалів Міжнар. наук.-практ. конф., Ніжин, 13–14 квітня 2017 року. Ніжин, 2017. С. 12–21.
85. Алієв Е. Б. Технологія і технічні засоби комплексної безвідхідної переробки макухи з насіння олійних культур з одержанням високоякісних повноцінних протеїнових добавок у вигляді пелет та твердого біопалива. *Пропозиція*. 2019. № 5. С. 187–193.
86. Алієв Е. Б., Пацула О. М. Результати досліджень конструктивно-технологічних параметрів установки для виготовлення пелет. *Перспективи та стратегія адаптивного і ресурсозберігаючого вирощування олійних культур в умовах зміни клімату*: зб. тез Міжнар. наук. інтернет-конф., 30 жовтня 2015 р. Запоріжжя: ІОК НААН, 2015. С. 146–147.
87. Алієв Е. Б., Пацула О. М. Результати експериментальних досліджень установки для виготовлення пелет з білкової фракції макухи олійних культур. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. Запоріжжя, 2015. № 22. С. 150–158.
88. Шевченко І., Шацький В., Махмудов І. Сучасні технології забезпечення тваринництва екологічно чистими кормами. *Агро перспектива*. 2009. № 11(107). С. 74–78.
89. Адамчук В. В., Братишко В. В., Кудринський Р. Б. и др. Механизация и автоматизация производства молока / под общ. ред. Адамчука В. В., Фененко А. И. Нежин: ЧП Лысенко Н. М., 2013. 324 с.
90. Система технологій та машин для виробництва молока і яловичини / за ред. Присяжнюка М. В., Петриченка В. Ф. Київ: Аграрна наука, 2013. 336 с.
91. Опейда Й., Швайка О. Глосарій термінів з хімії. Донецьк: Вебер, 2008. 758 с.
92. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. Москва: Мир, 1974. 678 с.
93. Тимофеев Н. П. Растительный белок и регуляция его уровня в кор-мопроизводстве. Агенство научно-технической информации. 2003. 18 с.
94. Производство белковых кормов и добавок к ним на основе кавитационного измельчителя. *Лицензинторг*: вебсайт. 2012. URL: http://www.licenz.ru/protein_feed.html.

95. Алієв Е. Б., Луц П. М., Верета В. В. Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми роторно-кавітаційного диспергатора кормосумішей. *Сучасні проблеми та технології аграрного сектору України: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф.*, 21 листопада 2019 року. Ніжин, 2019. С. 15–23.
96. Минзанова С. Т., Миронов В. Ф., Соснина Н. А., Выштакалюк А. Б. Технологические аспекты получения кормовых добавок из амаранта. Казань: КазНЦ РАН, 2000–2012. URL: <http://rudocs.exdat.com/docs/index-66067.html>.
97. Антонюк А. П. Технология производства белково-витаминных минеральных кормовых добавок из отходов пищевой и перерабатывающей промышленности. *Инновационные пути развития свиноводства в России: материалы междунар. конф.*, 14–16 ноября 2011. Москва: Пищепромиздат, 2011.
98. Ковалёв А. В. Технология влажного гомогенного кормления сви-ней, как инструмент повышения рентабельности и конкурентоспособности промышленных свинокомплексов. *Инновационные пути развития свиноводства в России: материалы междунар.ю конф.*, 14–16 ноября 2011. Москва: Пищепромиздат, 2011.
99. Мещеряков И. В., Анушенков А. Н. Некоторые принципы изучения многоступенчатого проточного устройства гидроударно-кавитационного. *Молодёжь и наука: сборник материалов VIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 155-летию со дня рождения К. Э. Циолковского*. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2012. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section08.html>, свободный.
100. Роторний гомогенізатор: пат. 65406 Україна: B01F 7/00 (2006), B01F 13/06 (2006.01). / Долінський А. А., Басок Б. І., Кравченко Ю. С., Гартвіг А. П., Коба А. Р., Піроженко І. А. № 2003087330; заявл. 04.08.2003; опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1. 3 с.
101. Роторний кавітаційний диспергатор: пат. 97802 Україна: (2015.01) B01F 7/00. / Лиходід В. В., Забудченко В. М., Луц П. М., Доруда С. О., Лисенко Д. М. № у 201410048; заявл. 12.09.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7. 6 с.
102. Насос-гомогенізатор6 Деклараційний пат. 57304 Україна: 7 A01J11/16. / Гвоздев О. В., Кокоулін Е. П. № 2002076305; заявл. 29.07.2002; опубл. 16.06.2003, Бюл. № 6. 5 с.
103. Роторний кавітаційний диспергатор-гомогенізатор: пат. 147500 Україна: (2006) B01F 7/00, B01F 13/06 (2006.01). / Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., Алієва О. Ю., Малєгін Р. Д. № у 202008225; заявл. 22.12.2020; опубл. 12.05.2021, Бюл. № 19. 6 с.
104. Aliiev E., Aliieva O., Maliehin R. Technical and technological provision of complex waste processing of plant raw oil cultures in food for organic animals. *Scientific Horizons*. 2020. № 07(92). P. 112–119. URL: <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-92-7-112-119>.
105. Aliiev E., Maliehin R., Ivliev V., Aliieva O. Simulation of the process of cavitation treatment of liquid feed: Техніко-технологічне забезпечення

- комплексної безвідходної переробки рослинної сировини олійних культур у корми для органічного тваринництва. *Scientific Horizons*. 2021. № 24(2). Р. 16–26. URL: [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(2\).2021.16-26](https://doi.org/10.48077/scihor.24(2).2021.16-26).
106. Алиев Э. Б., Алиева О. Ю., Малегин Р. Д. Безотходная переработка семян сафлора в корма для органического животноводства. *Олійні культури: сьогодення та перспективи*: збір. тез Міжнар. наук. інтернет-конф. (14 травня 2020 р.). Запоріжжя: ІОК НААН, 2020. С. 80–81.
 107. Алієв Е. Б., Малегін Р. Д. Ефективність впровадження технології годівлі тварин кормами після кавітаційної обробки. *Найновітє научні постиження – 2020*: Матеріали XVI междунар. науч. практ. конф. (15–22 март 2020 г.). Т. 3. София: Бял ГРАД-БГ ОДД, 2020. С. 39–41.
 108. Алієв Е. Б., Миколенко С. Ю., Яропуд В. М., Малегін Р. Д. Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми кавітаційного диспергатора-гомогенізатора сільськогосподарської сировини рослинного походження на кормові цілі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. № 2 (109). С. 5–15. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-2-1>.
 109. Алієв Е. Б., Алієва О. Ю., Малегін Р. Д. Результати чисельного моделювання кавітаційного диспергатора-гомогенізатора сільськогосподарської сировини рослинного походження. *Біоенергетичні системи*: матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф. «Біоенергетичні системи» (29 травня 2020 р.). Житомир: Поліський національний університет, 2020. С. 76–79.
 110. Алієв Е. Б., Малегін Р. Д. Обґрунтування доцільності використання диспергаторів рідких кормів. Сучасні проблеми землеробської механіки: матеріали XXI Міжнародної наукової конференції. Харків: ХНТУСГ, 2020. С. 7.
 111. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., Алієва О. Ю., Малегін Р. Д. Результати чисельного моделювання кавітаційного диспергатора рідких кормів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2020. № 21. С. 33–40. URL: <https://doi.org/10.37700/ts.2020.21.33-40>.
 112. *Extrusion Cooking* / ed. by R. Guy. Soustons: Woodhead, 2001. 216 p. URL: <https://doi.org/10.1201/9781439822944>
 113. Moscicki L. Effect of screw configuration on quality and SME value of corn extrudate. Teka commission of motorization power industry in agriculture. 2003. Vol. 3. P. 182–186.
 114. Jusko S., Mitrus M., Moscicki L., Rejak A., Wojtowicz A. Wpływ geometrii układu plastyfikującego na przebieg procesu ekstruzji surowców roślinnych (in Polish). *Inżynieria Rolnicza*. 2001. Vol. 2. P. 124–129.
 115. Сапа В. Ю. Совершенствование конструктивно-режимных параметров экспандера: дис... канд. техн. наук. Оренбург, 2009. 161 с.
 116. Moscicki L., Mitrus M., Wojtowicz A. Technika ekstruzjiw przetworstwie rolno-spo zywczym (in Polish). Warszawa: PWRiL, 2007. 222 p.
 117. Huimin Li. The effect of expanded and extruded process on pellets physical properties and in sacco rumen degradability: master's Thesis. 2021. 40 p. URL: <https://hdl.handle.net/11250/2831222>.

118. Razzaghi A., Larsen M., Lund P., Weisbjerg M. R. Effect of conventional and extrusion pelleting on in situ ruminal degradability of starch, protein, and fibre in cattle. *Livestock Science*. 2016. Vol. 185. P. 97–105. URL: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2016.01.017>.
119. Reduction of ANF in soybeans by means of hydrothermal treatment and expander. *Amandus Kahl GmbH*: website. 2022. URL: www.akahl.com.
120. Amandus Kahl GmbH. Technical materials, laboratory reports (personal communication). *Amandus Kahl GmbH*: website. 2022. URL: www.akahl.com.
121. Hancock J. D. Extrusion technologies to produce quality pig feed. *Feed Technol*. 2001. Vol. 5 (3). P. 18–20.
122. Moscicki L., Kozłowska H., Pokorny J., Zuilichem D. J. van Expander cooking of rapeseed – faba bean mixtures. *Electronic journal of polish Agricultural Universities*. 2003. Vol. 6. № 2. URL: <http://www.ejpau.media.pl/volume6/issue2/engineering/art-01.html>.
123. Navarro G. H., Lopez C. C., Garcia E., Forat S. M. Evaluacion de la soja integral procesada mediante expansion en dietas practicas de pollo de engorde. *American Soybean Association. Soya Noticias*. 2001. Vol. 265. P. 14–22.
124. Zuilichem D. J. van, Poel A. F. B. van der, Cruz U., Stolp W., Wolters I. Termo mechanical treatments of soya beans. Full- fat Soya: materials 2nd International conference. Hungary: ASA, 1996. P. 99–117.
125. Долуд М., Вальтер Г. КАHL – експандований структурований корм для поросят, свиней та свиноматок. *Корма и кормление*. 2016. № 8. С. 40–44.
126. White J. L., Potente H. Screw Extrusion. Munich: Hanser, 2003. ISBN 3446196242.
127. Nielsen S. K. Numerical modeling of the wood pelleting process: master thesis. 2016. 121 p.
128. Rodríguez E. O. Numerical simulations of reactive extrusion in twin screw extruders: thesis for the degree of Doctor of Philosophy in chemical engineering. Waterloo, Ontario, Canada, 2009. 254 p.
129. Lewandowski A., Wilczynski K. Modeling of twin screw extrusion of polymeric materials. *Polymers*. 2022. Vol. 14, № 274. 28 p. URL: <https://doi.org/10.3390/polym14020274>.
130. Darnell W. H., Mol E. A. J. Solids Conveying in Extruders. *SPE Journal*. 1956. № 12. P. 20–29.
131. Cundall P. A., Strack O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*. 1979. № 29. P. 47–65.
132. Aliev E. B., Bandura V. M., Pryshliak V. M., Yaropud V. M., Trukhanska O. O. Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 54, № 1. P. 95–104.
133. Алієв Е. Б., Лабатюк Ю. М. Чисельне моделювання механіко-технологічних процесів агропромислового виробництва. *Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві*: Вісник Харків-

ського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків, 2017. № . 180. С. 67–71.

134. Братішко В. В. Дослідження геометричних параметрів гвинта грануля-тора кормів з основою каналу у вигляді частини кола. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2013. № 132. С. 415–420.
135. Братішко В. В. Дослідження впливу геометричних параметрів робочих органів гранулятора кормів на інтенсивність процесу гранулювання. *Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві*: матеріали І-ї наук. -техн. конф. Глеваха, 2012. С. 7–9.
136. Братішко В. В. Модель зміни тиску у каналі гвинта гранулятора. *Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві: матеріали XXII та IX Всеукраїнської конференції-семінару аспірантів, докторантів та здо-бувачів у галузі аграрної інженерії*. Глеваха: ІМЕСГ, 2014. С. 130–131.
137. Johnson K. L. *Contact Mechanics*. 1987. 434 p. URL: <https://doi.org/10.1017/S09781139171731>
138. Алієв Е. Б., Лінко М. О. Аналіз техніко-технологічного оснащення процесів експандованого приготування кормів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 1(116). С. 51–57.
139. Алієв Е. Б., Лінко М. О. Методика чисельного моделювання процесу експандованого приготування кормів. *Наукові аспекти формування сучасних агротехнологій – інновації молодих вчених для забезпечення сталого розвитку агропромислового комплексу*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, присвяченої Дню науки (Херсон, 20 травня 2022 року). Херсон: ІЗЗ НААН, 2022. С. 160–161.
140. Алієв Е. Б., Шевченко І. А. Дослідження аеродинамічних властивостей насіння олійних культур. *Вісник аграрної науки*. 2017. № 3 (769). С. 63–65.
141. Повышение микробиологической безопасности хлеба из диспергированного зерна пшеницы / Маркитанова О. А., Малкина В. Д., Балуюн Х. А. и др. *Современная наука и инновации*. 2016. № 3. С. 114–120.
142. Хлеб из биоактивированного зерна пшеницы / Санина Т. В., Магомедов Г. О., Алехина Н. Н. и др. Воронеж: ВГТА. 2008. 172 с.
143. Конева С. И. Закваски из диспергированного влияния ржи и их влияние на качество хлеба. *Ползуновский вестник*. 2011. № 3/2. С. 97–100.
144. Корячкина С. Я., Осипова Г. А. Макароны изделия: способы повышения качества и пищевой ценности. Орел: Труд, 2006. 276 с.
145. Головацкий В. А. Механические и физико-химические способы обработки сырья растительного происхождения с использованием импульсного воздействия. *Процессы и аппараты пищевых производств*. 2010. С. 1–13.
146. Руднев С. Д., Козлов М. А., Крюк Р. В. Анализ работы и исследование энергетических характеристик роторного диспергатора. *Техника и технология пищевых производств*. 2017. Т. 44, № 1. С. 73–80.

147. Попов А. М., Руднев С. Д., Рыбина О. Е. О селективном измельчении, селективности измельчения и селективной функции. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2006. № 5. С. 42–44.
148. Ошкордин О. В., Лаврова Л. Ю., Усов Г. А. Кинетика и динамика измельчения растительного сырья для производства пищевых продуктов. *Ползуновский вестник*. 2011. № 2/2. С. 202–206.
149. Усов Г. А., Никитин А. М., Ахмедьянов Р. М. Технология получения наноструктурированных дисперсных систем органических полимеров методом механоактивации применительно к производству сухих строительных смесей. *BALTIMIX – сухие строительные смеси для XXI века: технологии и бизнес: IX Международная специализированная отраслевая конференция*. Петрозаводск, 2009. С. 3.
150. Шаршунов В. А., Киркор М. А., Евдокимов А. В., Урбанчик Е. Н. Обоснование параметров измельчения пророщенного зерна злаковых культур в сушилке-диспергаторе. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019. С. 255–259.
151. Курилович Н. Н., Шуляк В. А., Евдокимов А. В. Влияние температурно-влажностных характеристик пророщенного зерна на его структурно-механические свойства. *Зерновые продукты и комбикорма*. 2009. № 3. С. 14–17.
152. Шаршунов В. А., Курилович Н. Н., Шуляк В. А., Евдокимов А. В. Влияние скорости деформирования и ударного действия нагрузки на структурно – механические характеристики пророщенного зерна. *Хранительна наука, техника и технологии 2010: научна конференция с международным участием / редкол.: Г. Вълчев и др. Пловдив, 2010. Т. LVII, № 2. С. 401–407.*
153. Евдокимов А. В. Влияние режимных и технологических параметров работы сушилки–диспергатора на процесс термомеханической обработки пророщенного зерна. *Актуальные проблемы и современные технологии производства продуктов питания: сб. труд. Междунар. науч.-практ. конф., Кутаиси, 12–13 июня / редкол.: М. Силагадзе и др. Кутаиси, 2014. С. 350–353.*
154. Диспергатор: пат. 70499 Украина: В02С 9/02. / Голубев О. В., Григорян К. Г. № и 201115128; заяв. 11.06.2012; опуб. 11.06.2012, Бюл. № 11. 4 с.
155. Устройство для измельчения пищевых продуктов: пат. 2297281, Российская Федерация: В02С 18/30. / Миков А. Г., Борзенкова Т. А., Перов Ю. П., Гаранин Л. В. № 2005130372/03; заяв. 29.09.2005; опуб. 20.04.2007, Бюл. № 11. 5 с.
156. Apparatus for material grinding: Patent 4641791 United States: В02С 13/10 / Cermanov A. S., Kazarov L. R., Valev M. S., Jelyazcov J. C., Kolev R. C. all of Stara Zagora, Bulgaria. Statement: 10.02.1987. 5 p.
157. Pivovarov A., Mykolenko S, Hez' Y., Shcherbakov S. Plasma-chemically activated water influence on staling and safety of sprouted bread. *Journal of Food Science and Technology*. 2018. Vol. 12, № 2. P. 100–107. URL: <https://doi.org/10.15673/fst.v12i2.940>.

158. Измельчитель пищевых продуктов: пат. 2121399, Российская Федерация: В02С18/30. / Акимов М. З., Момотюк С. Н., Светайло Ю. А. № 97121132/13; заявл. 29.12.1997; опубл. 10.11.1998. 5 с.
159. Устройство для приготовления тестовой массы из зерна: пат. 2156065, Российская Федерация: А21С1/12, В02С18/30 / Жикленков В. К., Корсакова Г. А., Третьяков И. Ф. № 2000104094/13; заявл. 22.02.2000; опубл. 20.09.2000. 7 с.
160. Гевко І. Б. Гвинтові транспортно-технологічні механізми: розрахунок і конструювання. Тернопіль: ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. 307 с.
161. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Дячун А. Е. Дослідження крутильних коливань шнека у випадку дії імпульсних сил. *Науковий вісник НГУ*. 2015. № 5. С. 64–68.
162. Грудовий Р. С. Моделювання характеру навантаження на гвинтові робочі органи. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград: КНТУ*, 2012. № . 42, ч. 2. С. 171–181.
163. Sharshunov V. A., Kirkor M. A., Evdokimov A. V. Process of crushing sprouted grains of rye, wheat and triticale in combined disperser dryer. *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук*. 2019. Т. 57, № 3. С. 357–367 URL: <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2019-57-3-357-367>.
164. Pankiv V. R., Tokarchuk O. A. Investigation of constructive geometrical and filling coefficients of combined grinding screw conveyor. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 51, № 1. P. 59–68.
165. Hevko R. B., Zalutskyi S. Z., Tkachenko I. G., et al. Development and investigation of reciprocating screw with flexible helical surface. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 46, № 2. P.133–138.
166. Hewko B. M., Popovich P. V., Diachun A. Y., et al. The study of bulk material kinematics in a screw conveyor-mixer. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 47, № 3. P. 156–163.
167. Marinov K. Theoretical exploration on the process of movement of seeds of dewingers with continual action. *Forestry Ideas*. 2005. № 2. P. 84–90.
168. Науменко М. М., Миколенко С. Ю., Гурідова В. О., Гезь Я. В. Обґрунтування математичної моделі взаємодії зернової сировини з шнековим живильником при диспергуванні. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2021. Т. 1, № 21. С. 101–108.
169. Науменко М. М., Миколенко С. Ю., Гурідова В. О., Гезь Я. В. Математична модель переміщення зернової сировини при взаємодії з диспергатором і шнековим живильником. *Вісник ХНУ: Технічні науки*. 2022. № 2. С. 92–96.
170. Мачихин Ю. А., Мачихин С. А. Инженерная реология пищевых материалов. Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 216 с.
171. American association of cereal chemists (AACC). Method 74–09: Measurement of bread firmness by universal testing machine. American Association of Cereal Chemists. St. Paul. MN, 1995. 4 p.

172. Миколенко С. Ю., Алієв Е. Б., Алієва О. Ю., Долгіх Д. О. Структурно-механічні характеристики хлібних виробів із різним вмістом борошна амаранту. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2022. № 32. С. 132–142.
173. Пристрій для автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових мас: пат. 151728 Україна: (2006) G01N 3/44 (2006.01), G01N 19/00, G01B 3/00 / Алієв Е. Б., Миколенко С. Ю., Дудін В. Ю. № u202106596; заявл. 08.09.2022; опубл. 07.09.2022, Бюл. № 36. 6 с.
174. Пенетрометр: деклараційний пат. 8898 Україна: G01N 11/12 (2006.01), G01N 3/40 (2006.01) / Корнілович Б. Ю., Терліковський Є. В., Макаров А. С. № u200502648; заявл. 23.03.2005; опубл. 15.08.2005, Бюл. № 16. 3 с.
175. Напівавтоматизований текстурометр для визначення структурно-механічних показників харчових продуктів пат. 90314 Україна: (2014.01) G01B 9/00 / Шаніна О. М., Гурський П. В., Прасол Д. Ю., Бідюк Д. О., Кульомін Л. Г., Цопа О. І., Ганшин Д. Г. № u 201312887; заявл. 26.05.2014; опубл. 26.05.2014, Бюл. № 10. 5 с.
176. Mohsenin N. N. Physical properties of plant and animal materials. *Molecular Nutrition*. 1980. Vol. 31, № 7. P. 51–87.
177. Jain R. K., Bal S. Properties of pearl millet. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1997. № 66. P. 85–91.
178. Sahay K. M., Singh K. K. Unit operations in agricultural processing. New Delhi: Vikas Publishing House Pvt Ltd, 1994. 386 p.
179. Singh K. K., Goswami T. K. Physical properties of cumin seed. *Journal Agricultural Engineering Research*. 1996. Vol. 64(2). P. 93–98.
180. Nimkar M. P., Chattopadhyay K. P. Some Physical properties of green gram. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 2001. Vol. 80(2). P. 183–189.
181. Ogunjimi L., Aviara N., Aregbesola O. Some engineering properties of locust bean seed. *Journal Food En*. 2002. Vol. 55. P. 95–99.
182. McGinnis P. M. Biomechanics of sport and exercise. *Human Kinetics*. 2005. P. 85.

Наукове видання

Алієв Ельчин Бахтияр огли
Миколенко Світлана Юріївна
Сова Наталія Анатоліївна
Алієва Ольга Юріївна
Малєгін Роман Дмитрович
Лупко Кристина Олегівна
Лінко Микола Олександрович
Гезь Яна Василівна
Безугла Людмила Сергіївна

ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗВІДХОДНОЇ ПЕРЕРОБКИ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ У ХАРЧОВІ ПРОДУКТИ І КОРМИ

КОЛЕКТИВНА МОНОГРАФІЯ

За загальною редакцією доктора технічних наук,
старшого дослідника, професора кафедри
інжинірингу технічних систем **Алієва Е. Б.**

Кректор *Соколова Алла Василівна*



Підписано до друку 12.12.2022.
Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Друк цифровий. Ум. друк. арк. 11,16.
Наклад 100 прим. Зам. № 173.

ЛІРА

**ВИДАВНИЦТВО
ДРУКАРНЯ**

— ДНІПРО —

Видавництво та друкарня ПП «Ліра ЛТД».
Вул. Наукова, 5, м. Дніпро, 49107.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
та розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 6042 від 26.02.2018.

