

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Уманський національний університет

ЖУРАВЕЛЬ Д. П., ДІДУР В. В.



**МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ГЛИБОКОЇ ПЕРЕРОБКИ
НАСІННЯ РИЦІНИ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ БІОСІРОВИНУ**

Монографія

2025

УДК 631.37:631.3.00.65

*Рекомендовано до видання Вченою радою інженерно-технологічного факультету
Уманського національного університету (Протокол № 1 від 29 серпня 2025 р.)*

*Рекомендовано до видання Вченою радою механіко-технологічного факультету
Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра
Моторного (Протокол № 2 від 16 вересня 2025 р.)*

Рецензенти:

Братішко В. В., доктор технічних наук, професор, декан механіко-технологічного факультету Національного університету біоресурсів і природокористування України

Антощенко Р. В., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри мехатроніки, безпеки життєдіяльності та управління якістю Державного біотехнологічного університету

Демидов І. М., доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології жирів та продуктів бродіння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Журавель Д. П., Дідур В.В. **Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння рицини на енергетичну біосировину**: монографія. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. 275 с., іл.

Робота присвячена розробці технології глибокої переробки рицини і обґрунтуванню технологічних режимів та конструктивних параметрів обладнання для умов малотоннажного виробництва шляхом математичного моделювання процесів смаження, віджимання олії спільно з консолідацією «скелета» м'ятки рицинової сировини. Вперше розроблені математичні моделі процесу смаження з урахуванням гідродинаміки первинної та вторинної циркуляції мезги в кожному чані, а також з урахуванням витрати тепла і процесів фільтрації масла при його відтисканні з урахуванням одночасної консолідації «скелета» м'ятки. Чисельні рішення диференціальних рівнянь та на їх основі дослідження математичних моделей технологічних процесів дозволило обґрунтувати режими та конструктивні параметри обладнання для умов малотоннажного виробництва.

Монографія розрахована на технологів, конструкторів, що займаються виробництвом обладнання для малотоннажних підприємств з глибокої переробки рицини. Матеріал викладений у монографії може бути корисним для викладачів та магістрів за спеціальностями: «Агроінженерія», «Галузеве машинобудування» та «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

УДК 631.37:631.3.00.65

© Д. П. Журавель, В. В. Дідур

© ТДАТУ, УНУ, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАСІННЯ РИЦИНИ	7
1.1. Сучасні сорти рицини.....	7
1.2. Фізико-механічні властивості насіння рицини.....	9
1.3. Фізіологія насіння рицини.....	17
1.4. Технологічні властивості насіння рицини.....	20
1.5. Висновки до розділу 1.....	24
2. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА АПАРАТИ ДЛЯ ГЛИБОКОЇ ПЕРЕРОБКИ РИЦИНИ	25
2.1. Сучасні технології глибокої переробки рицини.....	25
2.2. Сучасне технологічне обладнання для переробки рицини.....	32
2.3. Продукти переробки рицини та сфера їх застосування.....	36
2.3.1. Рицинова олія та її похідні. Область застосування.....	37
2.3.2. Рицинова макуха і шрот.....	42
2.4. Техніко-технологічні особливості виробництва рицинової олії та кормової макухи.....	45
2.5. Висновки до розділу 2.....	46
3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ РИЦИНИ	48
3.1. Математичне моделювання процесів вологотеплової обробки м'ятки рицини.....	48
3.1.1. Сучасний стан проблеми волого-теплової підготовки олійної сировини при відтисканні олії.....	51
3.1.2. Розрахунок енергії зв'язку вологи з пористим тілом м'ятки рицини при смаженні її в багаточановій жаровні.....	54
3.1.3. Моделювання гідродинаміки мезги в багаточанній жаровні при волого-тепловій підготовці вилучення олії.....	80

3.1.4. Математична модель динаміки тепломасопереносу і фазових перетворень при сушінні м'ятки.....	94
3.1.5. Чисельне рішення математичної моделі вологотеплової обробки м'ятки у багаточановій жаровні.....	107
3.1.6. Розробка алгоритму розрахунку диференціальних рівнянь математичних моделей.....	112
3.1.7. Результати визначення кінетики і динаміки зневоднення і пропарювання м'ятки в багаточанній жаровні.....	114
3.2. Математичне моделювання процесів віджиму олії з олійної сировини у шнековому пресі.....	126
3.2.1. Фізика процесу пресування мезги	126
3.1.2. Рух високов'язких матеріалів по гвинтовим траєкторіям.....	127
3.2.3 Види тиску, що діють на робочі органи гвинтового преса.....	130
3.2.4. Закономірності процесів обробки мезги в гвинтовому пресі.....	139
3.2.5. Сили, які діють в розгорнутому каналі шнека.....	143
3.2.6. Математична модель процесу консолідації при видділенні олії в гвинтовому пресі	151
3.2.7. Оптимізація конструктивних параметрів шнекового преса для віджимання мезги насіння рицини.....	162
3.2. Математичне моделювання процесу очищення пресової рицинової олії.....	166
3.3.1. Фізика процесу освітлення віджатих у пресі рослинних олій способом електрофлотації.....	166
3.3.2. Гідродинаміка частинки домішок в рициновій олії під дією електричного поля в міжелектродному просторі	169
3.3.3. Гідродинаміка парогазової бульбашки в рициновій олії.....	175
3.3.4. Гідродинаміка крапель води в рициновій олії	180
3.3.5. Кінетика флотаційного очищення рицинової олії	182
3.4. Висновки до розділу 3.....	183

4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	186
4.1. Програма та методика експериментальних досліджень.....	186
4.2. Результати експериментальних досліджень.....	210
4.2.1. Результати експериментальних досліджень термодинамічних характеристик насіння рицини.....	210
4.2.2. Результати експериментальних досліджень ізотерм сорбції визначення енергії зв'язку вологи з елементами насіння рицини.....	213
4.2.3. Результати експериментальних досліджень ефективності технологічних процесів переробки рицини.....	215
4.2.4. Експериментальна перевірка адекватності математичних моделей віджимання та фільтрації рицинової олії.....	221
4.3. Розробка технологічної схеми переробки насіння рицини на малотоннажному підприємстві.....	238
4.4. Розробка технологічної схеми детоксикації.....	243
4.5. Висновки до розділу 4.....	246
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	248
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	250

ВСТУП

Серед олійних рослин, що вирощуються в Україні рицина є однією із найбільш рентабельних технічних культур. Продукти переробки рицини є сировиною для виробництва важливих товарів в різних галузях економіки насамперед: медицині, авіації, техніці, електротехніці, лакофарбній, парфумерній та інші. Нині ведуться науково-дослідні роботи по використанню рицинової олії в якості дизельного пального.

На жаль використання продуктів переробки рицини в названих галузях економіки в Україні виконується виключно за рахунок імпорту, не дивлячись на те, що в недалекому минулому Україна була активним гравцем на світовому ринку рицинового насіння. Тільки в Запорізькій області в 1982 р. посівами під рициною було задіяно 120 тис.га. Дефіцит рицинової олії в Україні компенсується виключно за рахунок імпорту, тому виробництво в Україні рицини призупинилося. Імпортозаміщення продуктів переробки рицини і насамперед рицинової олії потребує створення переробної бази на новій основі, оскільки використання для цього оліїекстракційних заводів не представляється можливим. Створення сітки малотоннажних переробних підприємств потужністю 15-45 тонн насіння в сутки, як виявилось, є найбільш перспективним напрямком відродження переробки рицини в Україні. Проблеми, що виникають при організації таких малотоннажних підприємств полягають, по-перше, у відсутності методів проектування технологічного обладнання, по-друге, у відсутності заводів-виробників такого обладнання. Виходячи з цього, проблема полягає у відсутності в Україні, та недостатньо опрацьованій у світі ресурсозберігаючій технології глибокої переробки рослинної сировини рицини в умовах малотоннажного підприємства. Вирішення даної проблеми можливо шляхом обґрунтування технологічних режимів та конструкційних параметрів відповідного устаткування, пристосованого для малотоннажних підприємств. Це дасть можливість розв'язати важливу науково-технічну проблему відродження виробництва насіння рицини в Україні та її переробку.

1. ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАСІННЯ РИЦИНИ

1.1. Сучасні сорти рицини

У 2001 році до Реєстру сортів рослин України були занесені такі сорти рицини: Хортицька 3, Хортицька 7, Олеся, Хортичанка.

Сорт Хортицька 3. Сорт ранньостиглий, з тривалістю вегетаційного періоду 90 - 110 днів. Висота рослини - 90 - 100 см, має крім центральної 2 - 3 продуктивних бічних кисті. Потенціал продуктивності сорту на півдні України представляє 15 - 17 ц / га. Олійність - 54 - 57%. Зміст рицинолевої кислоти в олії насіння - 87 - 89%. Маса 1000 шт. насіння - 300 - 320 г. Сорт стійкий до фузаріозного в'янення, пристосований до механізованого збирання врожаю. Рекомендується для вирощування в південних районах України.

Сорт Хортицька 7. Сорт середньостиглий. Тривалість вегетаційного періоду становить 110 - 125 днів. Висота рослини - 110 - 130 см, має щільну кисть з коробочками, що розтріскуються при дозріванні. Потенціал врожайності на півдні України становить 14 - 16 ц / га. Олійність - 54 - 57%. Зміст рицинолевої кислоти в олії насіння - 90 - 94%. Маса 1000 шт. насіння - 265 - 295 г. Сорт стійкий до фузаріозного в'янення, призначений для вирощування в фермерських та інших господарствах без трансформаційних змін збиральної техніки. Рекомендується для вирощування в південних районах України.

Сорт Олеся. Олеся ранній стиглий сорт, тривалість вегетаційного періоду становить 105 - 120 днів. Висота рослини - 100 - 120 см. Практично однокістева, з щільною центральною кистю. Потенціал врожайності на півдні України становить 16 - 18 ц / га. Олійність - 54 - 57%. Зміст рицинолевої кислоти в олії насіння - 84 - 89%. Маса 1000 шт. насіння - 270 г. Сорт стійкий до фузаріозного в'янення. Відрізняється дружним дозріванням, пристосований до механізованого збирання.

Сорт Хортичанка - середньостиглий сорт з вегетаційним періодом 110 - 125 днів. Висота рослин - 110 - 130 см, має щільну центральну кисть довжиною 30 - 40

см. Потенціал продуктивності сорту на півдні України - 17 - 21 ц / га. Олійність - 55 - 58%. Зміст рицинолевої кислоти в олії насіння - 86 - 89%. Маса 1000 шт. насіння - 300 - 315 г. Сорт стійкий до фузаріозного в'янення, пристосований до механізованого збирання врожаю. Рекомендується для вирощування в південних районах України.

Крім цих сортів раніше в державний реєстр рослин України було внесено наступні сорти рицини: ВНІМК-165 покращений, Донська крупнонасінна, Кубанська 15, Щербинівська. До реєстру також був включений сорт Громада, створений для умов поливу. Перспективні нові сорти Хортицька 1, Хортицька 2 і Хортицька 3, перші два сорти списку реєстру і Щербинівська створені в Росії і насінневий матеріал цих сортів в Україну не надходить. Насінництво сортів Хортицька 1 і Кубанська 15 з 1994 року розгорнуто в Інституті олійних культур.

Наведемо коротку характеристику перспективних сортів рицини, які повинні оброблятися на Україні.

Кубанська 15. Сорт, виведений Кубанською дослідною станцією спільно з співробітником ІМК м. Запоріжжя. Внесений до Державного реєстру сортів України. Сорт гібридного походження, середньо-стиглий, високоврожайний, найбільш високоолійний серед всіх сортів реєстру. Стійкий до поширеної і небезпечної хвороби рицини в Україні - фузаріозного в'янення. Придатний до механізованому- збирання, має високий штаб (велику висоту стебла від рівня ґрунту до центральної кисті).

Хортицька 1. Виведено в ІМК, м. Запоріжжя. Сорт визнаний перспективним, в Україні очікується його районування. Сорт високоврожайний, стійкий до фузаріозного в'янення. Висота рослин середня, центральна кисть закладається на 8 - 10 вузлі. Штаб рослин високий (50 - 60 см). Труднощів при механізованому прибирання не має.

Громада. Сорт виведений в Херсонському сільськогосподарському інституті. Внесений до Державного реєстру сортів України як сорт на зрошенні. Середньостиглий, високоврожайний, з хорошим вмістом олії в насінні. Високорослий, слабковетвістий. Штаб високий (70 - 90 см і більше). Придатний до комбайнового збирання ККС-6. У олії насіння рицини зміст рицинолевої кислоти до 85%.

Хортицька 2 виведена в інституті олійних культур шляхом гібридизації кращих сортів (Донська 7, ВНПМК 165 покращений). Сорт середньостиглий з сизими стеблами, слабковетвістий, вміст олії в насінні високий. Пристосований до механізованого збирання рицини комбайном ККС-6. Центральна кисть закладається на 8 - 10 вузлі. Стійкість до фузаріозного в'янення рицини висока.

Хортицька 2 спеціально селекціонований сорт на підвищений вміст рицинолевої кислоти в олії її насіння. В насінні міститься рицинової олії до 90%. У ряду сортів рицини її зміст має не більше 70 - 71%.

Хортицька 3 створена в Інституті олійних культур із сорту Кубанська 10. Перший вітчизняний сорт СНД селекціонована на скоростиглість. Вегетаційний період сорту менше середньостиглих сортів на 10 - 17 днів. Сорт гіллястий, має 2 - 3 продуктивних кисті. Щорічно в дослідках ІМК врожайність Хортицької 3 на 1,0 - 3,61 ц / га вище стандарту ВНПМК 165 покращеного. Штамб 35 - 40 см і більше, оптимальний для комбайнового збирання [6,78].

Зміст рицинолевої кислоти в олії добрий. У 1994 році на Вільнянській сортово-пробувальній станції серед випробовуваних сортів мав найвищу врожайність - 17,0 ц / га.

1.2. Фізико-механічні властивості насіння рицини

До основних фізико-механічних властивостей насіння рицини та їх складових частин, важливих при підготовчих процесах переробки, відносять: геометричні характеристики насіння; лущинність; маса 1000 штук; сипкість маси, міцність оболонки ядра; аеродинамічні властивості насіння, лузги та дробленого ядра [6].

Розміри олійних культур коливаються в широких границях в залежності від сорту та метеорологічних умов їх вирощування. Характеристики сортів представлені в табл. 1.1.

Коефіцієнти тертя руху елементів рослини рицини

Елементи рослин	Вологість, %	Поверхня тертя			
		Фанера соснова	Полотно Сноповязалки	Листова сталь, прокат	Листова гума
Насіння	7,0	0,23	0,22	0,38	0,84
Ядро	6,8	0,37	0,34	0,35	0,85
Третинки	8,5	0,34	0,36	0,47	0,96
Стебли	75,0	0,55	0,61	0,61	0,95
Листя	72,0	0,61	0,64	0,59	0,88
Черенки листові	85	0,77	0,70	0,68	1,05

Геометричні характеристики насіння рицини по довжині, ширині та товщині наведені на діаграмах (рис.1.1, рис. 1.2, рис. 1.3).

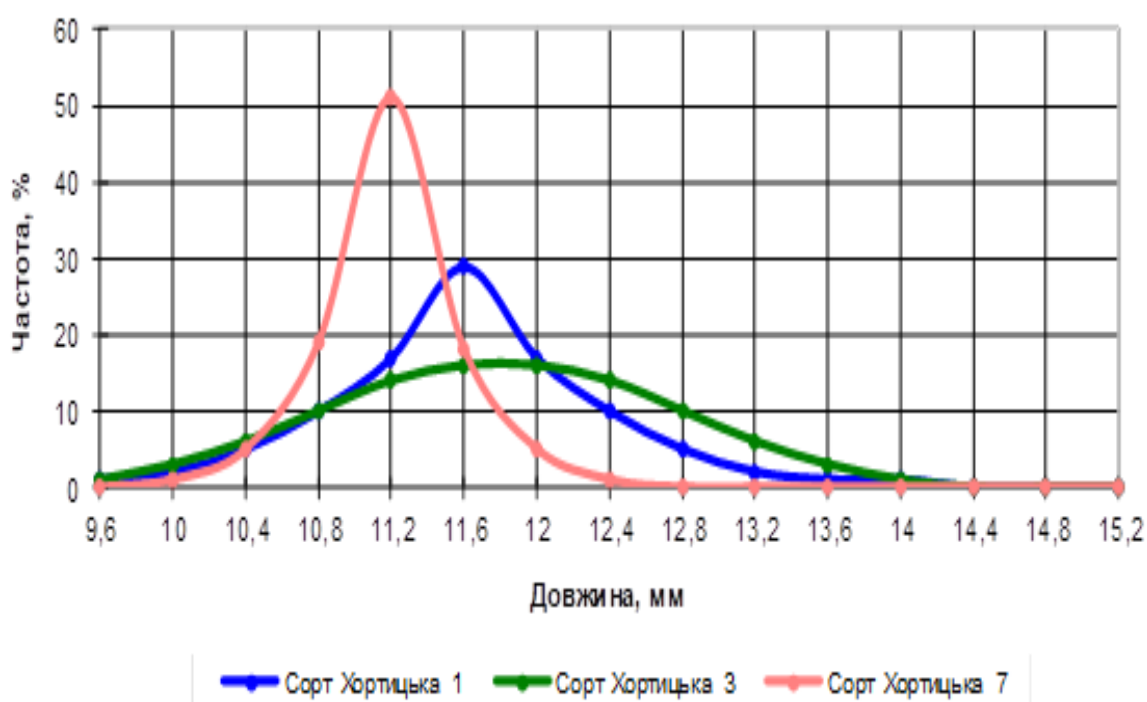


Рис.1.1. Варіаційні ряди розподілу насіння рицини по довжині

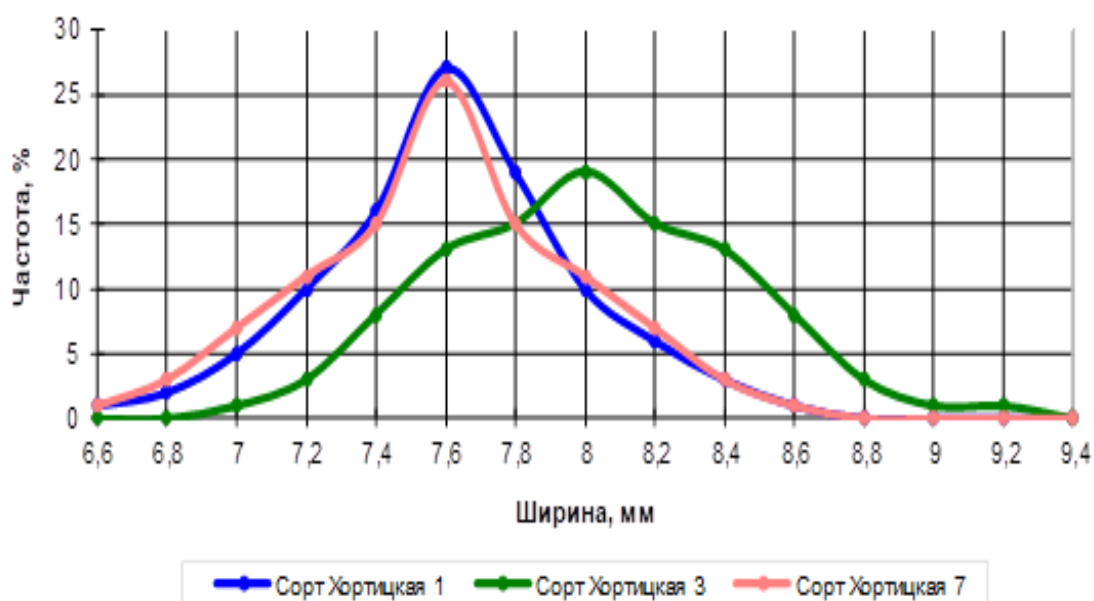


Рис 1.2. Варіаційні ряди розподілу насіння рицини по ширині

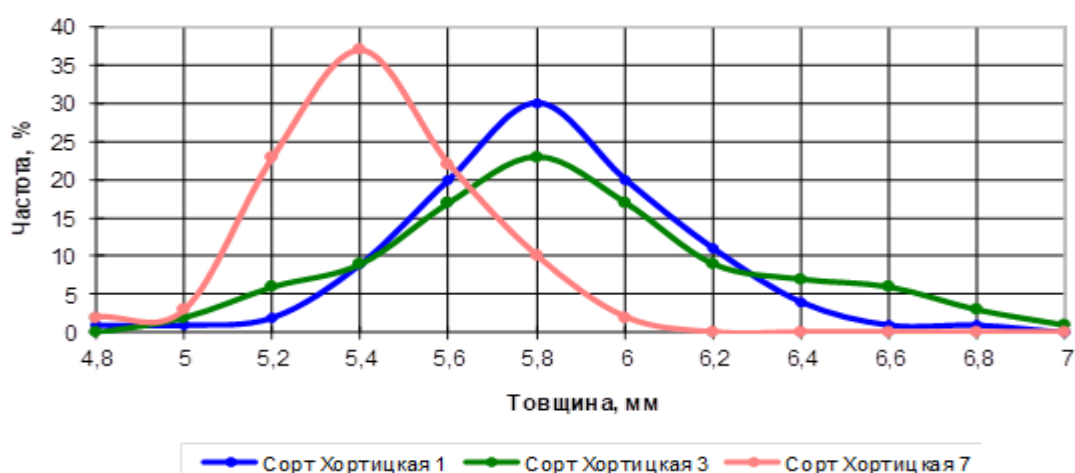


Рис.1.3 Варіаційні криві розподілу насіння рицини по товщині

За розмірними характеристиками можливо розрахувати об'єм, площу поверхні та коефіцієнт форми насіння рицини. Таким чином, варіаційні криві уявляють собою універсальні характеристики суміші насіння за їх розмірами, що важливе при дослідженні процесів відділення оболонки від ядра.

Насіння сорту Хортицька 2 і Хортицька 3 вимагають перед обрушенням калібрувати насіння на дві-три фракції, а Хортицька 1 на три, чотири фракції. Під час очи-

щення та калібрування насіння рицини доцільно застосовувати наступний набір ре-
шіт: Б-Ф8, Б20Ф9, Ф10 В-Ф5, Г-Ф4,5 товщина лушпиння і величину зазорів між ядром
і лушпинням насіння представлена в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Сортові характеристики насіння рицини

Сортові характеристики	Хортицька 1	Хортицька 3	Хортицька 7
<i>за довжиною</i>			
Вибіркова середня	11,104	11,176	10,676
Середнє квадра- тичне відхилення	3,591	3,62	3,395
Закон розподілу	$\Phi = 0,11e^{-\frac{(x-135,68)}{25,79}}$	$\Phi = 0,11e^{-\frac{(x-138,02)}{26,208}}$	$\Phi = 0,12e^{-\frac{(x-125,5)}{23,05}}$
<i>За шириною</i>			
Вибіркова середня	7,62	8,01	7,6
Середнє квадра- тичне відхилення	0,37	0,43	0,4
Закон розподілу	$\Phi = 1,07e^{-\frac{(x-58,2)}{0,27}}$	$\Phi = 0,93e^{-\frac{(x-64,4)}{0,37}}$	$\Phi = e^{-\frac{(x-57,92)}{0,32}}$
<i>За товщиною</i>			
Вибіркова середня	5,82	5,88	5,4
Середнє квадра- тичне відхилення	0,32	0,18	0,054
Закон розподілу	$\Phi = 1,25e^{-\frac{(x-33,97)}{0,2}}$	$\Phi = 2,22e^{-\frac{(x-34,75)}{0,065}}$	$\Phi = 7,39e^{-\frac{(x-29,19)}{0,0058}}$

Таблиця 1.3

Товщина лушпиння та величина зазору між ядром та лушпинням, мм

Найменування сорту	Товщина лушпиння		Зазори між лушпинням та ядром	
	За товщиною	за шириною	За товщиною	за шириною
Кубанська 15	0,210	0,211	0,365	0,309
Хортицька 1	0,215	0,215	0,255	0,275
Хортицька 2	0,218	0,220	0,227	0,284
Хортицька 3	0,217	0,217	0,268	0,283

Як видно з табл. 1.3 товщина лушпиння у всіх сортів практично однакова і становить 0,210 - 0,218 мм. Зазори між лушпинням та ядром найбільші у Кубанської 15, причому по товщині насіння вони у цього сорту трохи вище. У решти досліджуваних сортів зазори трохи нижче (особливо у Хортицької 2), причому більший зазор між лушпинням і ядром у цих сортів по ширині. Значить насіння Кубанської 15 при обрушенні повинні краще зберігати цілісність свого ядра.

Порівняно товста і щільна насіннева оболонка рицини із суцільною повітряною порожниною відбивається на цьому насінні як об'єкту сушіння. Насіннева оболонка складається із здерев'янілих клітин та складає 23 - 26% маси насіння, але в ній міститься більше половини всієї вологи насіння.

Основні вагові характеристики насіння рицини наведені в табл.1.4.

Таблиця 1.4

Основні вагові характеристики насіння рицини

Найменування сорту	Маса 1000 насінин, г	Питома маса, г/см ³	Об'ємна маса, кг/м ³	Вологість, %
Кубанська 15	284	0,810	514	5,8
Хортицька 1	267	0,770	536	6,4
Хортицька 2	259	0,790	510	5,8
Хортицька 3	274	0,800	476	6,3

Маса 1000 насінин характеризує їх крупність і залежить від сорту і умов вирощування. Її визначають по ДСТУ 12042-66 без урахування вологості.

З табл. 1.4 видно, що найбільша маса 1000 насінин у сорту Кубанська 15 і становить 284 г; найменша у сорту Хортицька 2 і становить 259 м.

Питома маса залежить від хімічного складу, наявності в насінні повітряних порожнин, ступеня зрілості і інших чинників. Сортування за цією ознакою покращує їх посівні якості. У зв'язку з великим сортовим розмаїттям питома маса насіння рицини коливається від 0,8077 г / см³ до 1,0 г / см³ у сорту Кубанська 15 середня питома маса 0,810 г / см³; Хортицька 1 - 0,770 г / см³; Хортицька 2 - 0,790 г / см³; Хортицька 3 - 0,8 г / см³.

Лушпинність насіння олійних культур визначають шляхом обрушення їх ручним способом. Відділені від ядра плодови оболонки (лузгу) зважують з точністю до 0,01 г. Результати визначення лушпинності мають вираз у відсотках до маси взятої для аналізу. Середнє з двох визначень приймають за лушпинність проби насіння.

Таблиця 1.5

Лушпинність насіння рицини

Сорт	Хортицька 1	Хортицька 3	Хортицька 7	Олеся	Хортичанка
Лушпинність, %	23,9	22,1	23,89	3,5	23,0

Лушпинність, натура та маса 1000 штук насіння рицини зумовлена сортовими особливостями та вологістю. Маса 1000 штук насіння рицини коливається від 280 до 320 грамів. Натура насіння складає близько 360 г/л.

В процесі виробництва олії зустрічаються різні види тертя: тертя поверхонь, внутрішнє тертя маси сипких матеріалів, внутрішнє тертя газів та рідин [5].

Внутрішнє тертя маси частинок визначається кутом внутрішнього тертя маси часток один об одного, або кутом природного скосу. Величина цього кута визначає геометрію конуса, що створюється при вільному насипі насіння: кут природного скосу є максимальним кутом нахилу насипу утвореного конусу. Для насіння рицини

кут природного скосу складає $24...46^{\circ}$, кут тертя по дереву – $20...25^{\circ}$, по сталі – $15...20^{\circ}$.

Травмування насіння рицини при ударі з робочою поверхнею залежить від швидкості удару, модуля пружності робочої поверхні, а також від напрямку удару. При значному руйнуванні насіння рицини підвищуються втрати як самого насіння так й олійної речовини, яка разом з лузгою виходить з технологічного процесу. Травмування насіння підтверджується експериментальними даними табл. 1.6.

Таблиця 1.6

Залежність травмування насіння рицини від швидкості удару з сталюю поверхнею

Швидкість удару, м/с	4,6	7,9	9,6	11,5	12,7	14,8
Травмування насіння, %	4,8	13,0	32,5	47,0	61,0	75,0

До основних механічних властивостей оболонок олійних культур відносять міцність, пружність та пластичність. Під міцністю оболонки розуміється величина навантаження (зусилля), при якому відбувається руйнування оболонки. При руйнуванні оболонок насіння зовнішня сила може діяти в різних напрямках. Можливі варіанти прикладених зусиль наведені на рис.1.4.

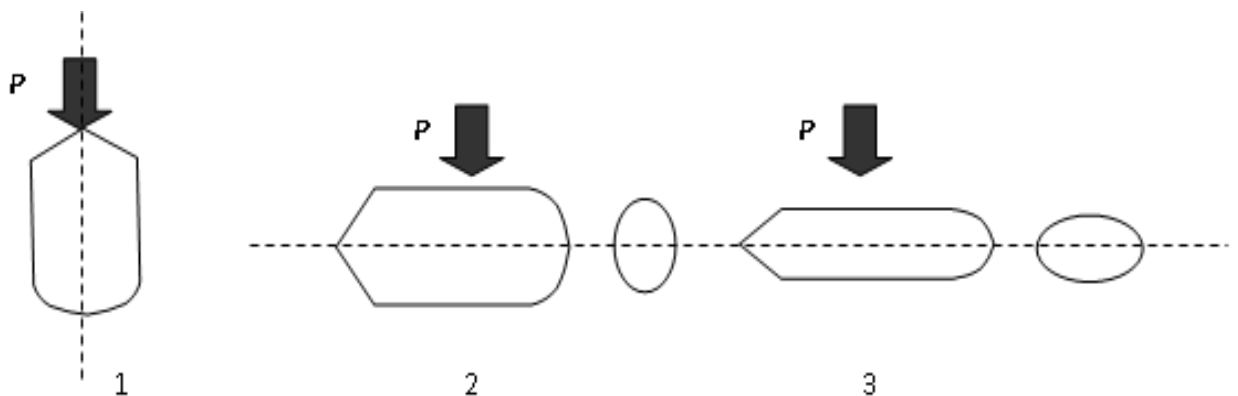


Рис.1.4. Варіанти прикладення зовнішніх зусиль при руйнуванні насіння рицини.

1 – по довжині, 2 – по ширині, 3 – по товщині.

Зусилля руйнування оболонки ядра

Напрямок дії зусилля	Значення, Н		
	Min	Max	Середнє
1	120,62	433,46	305,78
2	109,31	343,00	247,02
3	252,54	621,92	419,05

Приведені середні дані по міцності оболонок насіння рицини при статичному навантаженні в залежності від напрямку дії руйнівного навантаження відображені у таблиці 1.7. В цих дослідженнях насіння здавлювалося до з'явлення щілини, що супроводжувалося характерним звуком при руйнуванні оболонки та різким зниженням навантаження.

Треба відмітити, залежність міцності оболонок від напрямку прикладеного зусилля.

Також можливий розподіл насіння на фракції та його очищення від домішок за аеродинамічними властивостями.

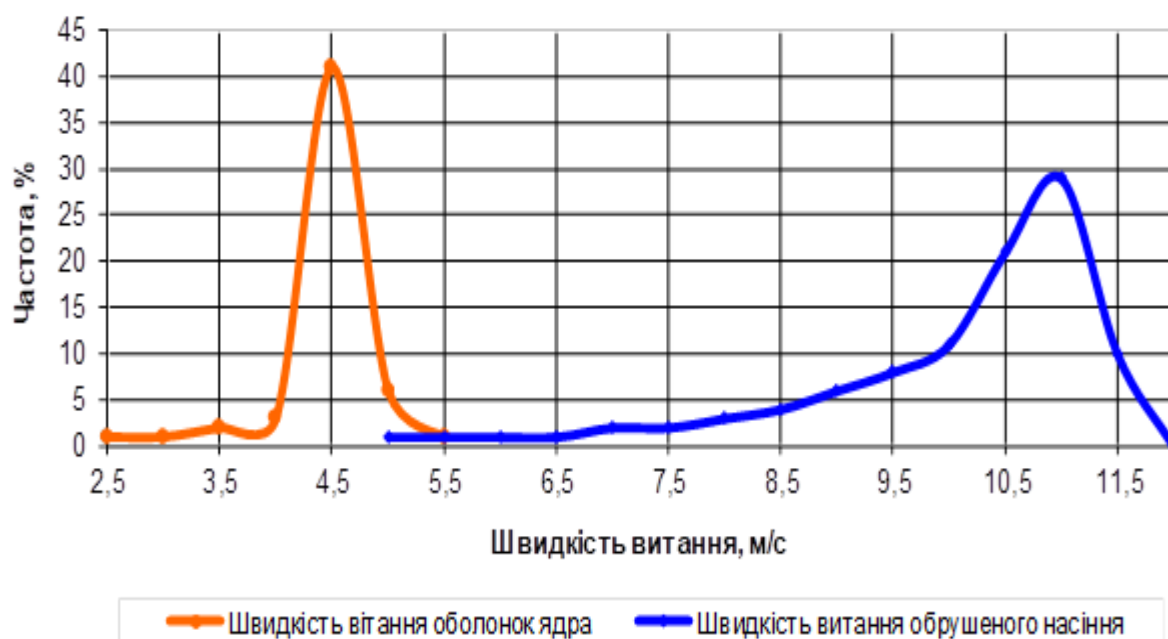


Рис.1.5. Варіаційні криві розподілу насіння рицини від лузги за аеродинамічними властивостями

Дослідження та вивчення фізико – механічних властивостей насіння рицини обумовлено розбіжністю характеристик її сортів, а також необхідністю їх визначення з метою подальшого дослідження процесу відділення насінневої оболонки при глибокій переробці рицини. З отриманих кривих видно, що геометричні розміри насіння коливаються в досить широкому діапазоні: по довжині від 9,6 мм до 15,2 мм, по ширині від 6,6 мм до 9,4 мм, по товщині від 4,8 мм до 7 мм; а відсоткове співвідношення розмірів насіння, обумовлюється сортовими особливостями.

Визначений діапазон значень зусилля руйнування оболонки ядра насіння рицини, в різних напрямках дії. Найменше зусилля затрачувалося при навантаженні по ширині, а найбільше при напрямку дії сили по товщині, що свідчить про необхідність орієнтування насіння в процесі обрушення.

Чисельні значення критичної швидкості витання обрушеного ядра та лузги насіння рицини значно відрізняються одне від одного, завдяки чому можливе повне очищення рушанки від лузги, при умові незначного руйнування обрушеного ядра.

1.3. Фізіологія насіння рицини

Рицина – олійна культура, батьківщина якої Північна Африка. Широко поширена в Індії, Китаї, в Південній Америці та в країнах Причорномор'я.

Зріле насіння складається з ядра і насінної оболонки. Ядро насіння рицини включає зародок, який складається з корінця та почечки - осьових органів, і особливо поживну тканину - ендосперм, яка містить основні поживні речовини насіння, в тому числі жирні олії. Сім'ядолі в насінні рицини розвинені дуже слабо. У насінні рицини насіннева оболонка стикається з ядром нещільно.



Рис. 1.6. Рицина (*Ricinus communis*):
 а - квітуча гілка рицини; б - суцвіття-кисть;
 в - коробочка (плід); г - третинні; д - насіння; г
 - подовжній розріз дозріває насіння:
 1 - карункули; 2 - епідерміс; 3 - провідні судини
 зародка; 4 - зародок; 5 - зародковий мішечок; 6
 - ендосперм; 7 - насіннева оболонка

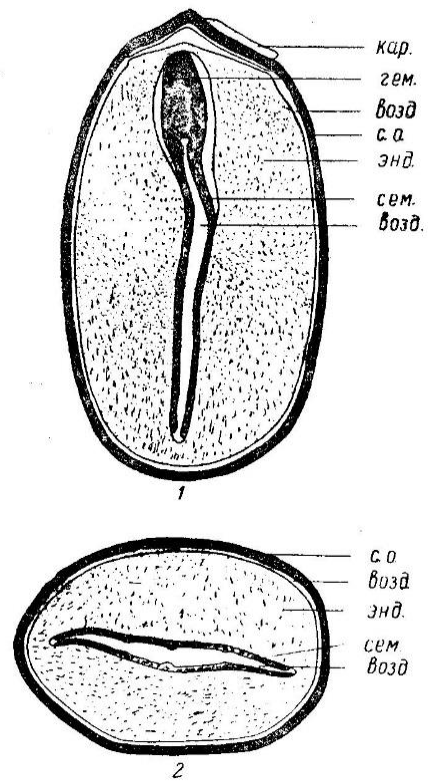


Рис.1.7. Схема анато-
 мічної будови насіння
 рицини:
 1 - подовжній зріз;
 2 - поперечний зріз

Кожна окрема складова частина насіння складається з різних тканин (під тка-
 ниною розуміється сукупність більш-менш однорідних клітин. Загальне уявлення про
 деякі тканини насіння рицини дає рис. 1.8.

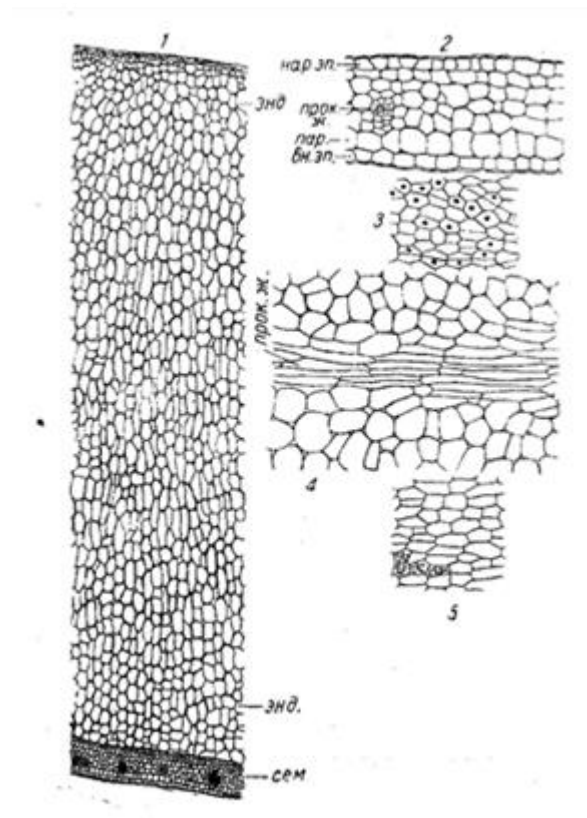


Рис. 1.8. Тканини ядра насіння рицини:

1 - фрагмент ендосперму і сім'ядолі; 2 - поперечний зріз насіння-частки;
 3 - 5 - тангенціальні зрізи тканин (вид на тканини з поверхня); 3 - зовнішній епідерміс сім'ядолі; 4 - мезофіл сім'ядолі з прокамбіальною жилкою; 5 - внутрішній епідерміс сім'ядолі.

Особливістю насіння рицини є висока олійність і тендітна оболонка насіння, що легко розтріскується.

Насіння рицини, як і будь-який організм, складається з величезної кількості клітин. Середні розміри клітин запасної тканини насіння рицини характеризуються (Насонов, 1939) наступними величинами (μ): довжина 58,4, ширина 40,4. Площа поперечного перерізу клітин в квадратних мікронах $+1873 \text{ мкм}^2$.

Наведені дані є середніми з великої кількості вимірювань для запасних тканин в цілому. Насправді в різних тканинах розміри клітин різні.

Клітини об'єднуються в різноманітні тканини; при цьому клітини різних тканин одного і того ж насіння, виконуючи різні біологічні функції, відрізняються по мікроскопічній структурі, і в кількісному відношенні (наприклад, розмір клітин, кількість алейронових зерен), проте всі клітини характеризуються загальною картиною будови.

Типова клітина запасних поживних тканин насіння складається з клітинної оболонки, що заповнена її внутрішньоклітинним вмістом, в межах якого можна розрізнити елеоплазму (плазму, що живиться олією) і в ній алейронові зерна, клітинне ядро і формені елементи клітин [6].

Внутрішньоклітинний вміст клітинки складається з заповненого найтоншого, але досить жорсткого гелієвого цитоплазматичного остова, просоченого більшою або меншою кількістю олії, причому в товщі остова, знаходяться алейронові зерна (а також інші форми тіла, зокрема сильно деформоване клітинне ядро), що жорстко сидять в ньому.

Клітинні стінки дуже тонкі: товщина стінки в насінні рицини 0,4μ. Клітинна оболонка складається з целюлози і тісно пов'язана з нею геміцеллюлозою; цей зв'язок настільки тісний, а кількість геміцеллюлозу настільки велика, що клітинні стінки насіння в більшості випадків не дають чітких реакцій на целюлозу.

1.4. Технологічні властивості насіння рицини

Інформація про технологічні властивості насіння рицини і продуктів її переробки необхідна для визначення параметрів технологічних режимів і конструктивно-експлуатаційних показників обладнання. Зокрема для розрахунку сил і режимів обрушування і попереднього подрібнення необхідно знайти не тільки середні розміри або межі зміни розмірів насіння, а й характер цих змін.

За даними [2-5,7,8] середній обсяг одного насіння рицини становить 0,289 см³. Середній розмір сучасних сортів насіння рицини коливається в широких діапазонах: довжина 9,6-15,2 мм; ширина 6,6-9,4 мм; товщина 4,8-7 мм.

Вологість насіння є визначальною при його волого-тепловій обробці. Критична вологість насіння рицини складає 7-7,5%.

Вологість насінної оболонки і ядра змінюється пропорційно вологості насіння.

Знаючи середній вміст води в насінні можна визначити вологість насінневої оболонки ($W_{об}$) і ядра ($W_{л}$) по формулах:

$$W_{об} = 1,05 W_c + 3,75, \quad (1.1)$$

$$W_{л} = W_{об} + 1,2 \quad (1.2)$$

W_c - вологість насіння, %

Коефіцієнт і кути тертя в основному визначають транспортно-механічні показники технологічних процесів.

Кути і коефіцієнти тертя насіння рицини і продуктів її переробки наведені в таблиці 1.8.

Об'ємна маса і щільність насіння, шпаруватість насінневої маси обумовлюють як вимоги до технологічної ємності, так і процесів переробки сировини.

Щільність насіння рицини 910 кг / м³, а натура 428-463 кг / м³, або 550-580 кг / м³.

Таблиця 1.8

Кути і коефіцієнти тертя насіння рицини і продуктів її переробки

Назва продукту	Вологість, %	Тертя в русі			
		По залізу		По дереву	
		Ф	Е	Ф	Г
Семена	6,7	16	0,87	20	0,364
	21,6	20,40	0,377	24	0,445
Рушанка	4,8-6,1	27 ⁰	0,510	32	0,624

При зволоженні насіння рицини щільність та їх натура збільшується. Якщо щільність насіння більше 100 кг / м³, шпаруватість збільшується вологість зменшується.

Об'ємна маса насіння рицини 450-550 кг / м³, м'ятка рицини 515-560 кг / м³, мезга напівзнежирена - 745-840 кг / м³. Щільність насіння рицини 800 кг / м³ [6].

$$\rho = \rho_v / (1 - \varepsilon), \quad (1.3)$$

де ρ , ρ_v – щільність і об'ємна щільність насіння;

ε - шпаруватість насінневої маси.

Шпаруватість змінною маси рицини становить 0,404.

Аеродинамічні властивості, які визначають вимоги до процесу шеретування та пневмотранспортування насіння і аераційних процесів характеризуються значеннями коефіцієнтів парусності насіння рицини і продуктів переробки.

Насіння 0,09; ядро 0,09; лущиння 0,61.

Середнє значення швидкості витання для насіння, ядра і насінної оболонки рицини м / с. Насіння 10,2; ядро 10,2; оболонка 4,0.

Таблиця 1.9

Коефіцієнти опору, парусності і критичної вологості насіння, ядра і оболонки рицини

Аналізований матеріал	При мінімальної $u_{кр}$			При максимальної $u_{кр}$			При $u_{кр}$ властивій найбільшій кількості матеріалу		
	к	$K_{п}$	$u_{кр}$	к	$K_{п}$	$u_{кр}$	к	$K_{п}$	$u_{кр}$
Насіння	0,28	0,27	6,0	-	-	-	0,37	0,09	10,2
ядро	0,25	0,27	6,0	-	-	-	0,38	0,09	10,2
Оболонка	2,14	0,76	3,6	0,65	0,23	6,5	1,7	0,61	4,0

У таблиці 1.9 наведені величини коефіцієнтів опору K (безрозмірна величина), коефіцієнтів парусності $K_{п}$ і критичної швидкості $V_{кр}$ насіння, ядра і оболонок рицини. Значення D_0 і $V_{кр}$ взяті з роботи [25], $K_{п}$ - розраховані за рівнянням:

$$K = K_{\text{п}} y_0 F/G \quad (1.4)$$

де y_0 – питома маса повітря;

F – площа мідельового перетину частинки;

G – вага частки.

Як видно з рівняння (1.4), коефіцієнт парусності є більш узагальненою характеристикою частки, ніж коефіцієнт опору. Коефіцієнт парусності має розмірність $1/L$, тобто $1/m$. Слід зауважити, що в роботі за мідельового перетину брався перетин кулі, рівновеликий об'єму частки по меридіану.

Аеродинамічні властивості купи рицини з-під комбайна не дозволяють чітко визначити її компоненти повітряним потоком. наприклад, у сорті ВНДЮК -165 насіння мають швидкість витання 8-12 м / с, третьїнкі 6-12 м / с, коробочки 7-15 м / с, шеретоване насіння 7-11 м / с, плодові оболонки 2,9 -6 м/с, дрібні органічні домішки - 2-5,5 м / с, черешки листів - до 11 м / с. Питома теплоємність сухої речовини насіння рицини за експериментальними даними при температурі 18 і 69 ° С відповідно дорівнює 1646 і 1951 Дж / (кг ° С) [17], а обчислена за законом Коппа - 1598 Дж / (кг ° С). Питома теплоємність у Дж / гк насіння рицини при вологості від 10 до 35% і температурі 40 ° С можна визначити за формулою (1.5), а при вологості 18,6% і температурі від 30 до 70 ° С за формулою (1.6):

$$c = 1904 + 18,47w \quad (1.5)$$

$$c = 1937,25 + 8,25t \quad (1.6)$$

де t - температура, ° С

Питома теплоємність сухого насіння рицини при температурі 0°С становить 1820 Дж/(кг°С). Експериментально встановлено, що питома тепло-ємність абсолютно сухого насіння зі збільшенням температури на один градус збільшується на 1,68 ДЖ / (кг ° С), тобто має місце залежність.

$$c = 1820 + 1,68t \quad (1.7)$$

1.5. Висновки до розділу 1

1. Південь України є ґрунтово-кліматичною зоною найбільш вдалою для виробництва високорентабельної культури - рицини. Крім ґрунтово-кліматичних умов в Україні присутні всі необхідні умови для відновлення виробництва і переробки рицини.

Є база для селекції. У реєстрі рослин в Україні зареєстровано 7 сортів рицини. Є досвід обробітку рицини в аґарних підприємствах. На жаль база для переробки насіння рицини, відсутня, що є стримуючим фактором просування на ринок цієї культури.

2. В Україні не дивлячись на припинення виробництва рицини в промислових масштабах науково-дослідні роботи по вдосконаленню технологій виробництва і переробки цієї олійної культури тривають, що може стати неодмінними умовами для відродження в Україні виробництва та переробки рицини і цим самим створити сотні робочих місць.

3. Встановлено основні фізико-механічні, фізіологічні, технологічні та теплофізичні властивості насіння рицини, які є вихідними при виборі технологічної схеми і технологічного обладнання для переробки рицини в умовах малотоннажного виробництва.

2. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА АПАРАТИ ДЛЯ ГЛИБОКОЇ ПЕРЕРОБКИ РИЦИНИ

2.1. Сучасні технології глибокої переробки рицини

Всі існуючі технології переробки рицини можна розділити на два методи вилучення олії з насіння: механічне віджимання олії, названий методом пресування, і розчинення олії в легколетучих органічних розчинниках, або метод екстракції. Ці два основні методи використовуються в технології виробництва рослинних олій або самостійно, або в поєднанні один з одним [6].

Сучасні високопродуктивні заводи з переробки насіння рицини працюють за схемою попереднє пресування - екстракція і волого-теплова детоксикація рицинової макухи.

Вивчено досвід переробки насіння рицини на рицинову олію по схемі попереднє пресування - екстракція на заводах Р. Молдови (Бельцький олійно-жировий комбінат, Атакській олійноекстракційний завод) і Росії (Білоріченський олійноекстракційний завод, Краснодарський олійний завод №2), а також конструкцію обладнання, яке використовується в світі.

Так з 1968 року в Молдавії була освоєна технологія переробки насіння рицини за схемою форпресування - екстракція. Якщо при переробці пресовим способом загальні втрати олії склали 2,8%, то вже в перший рік після переходу на екстракційний спосіб вони знизилися до 1,24%. Однак, продуктивність модернізованих екстракторів ВС-1250, широко застосовуваних на олієекстракційних заводах становить 500 т на добу по переробці форпресових пелюсток в перерахунку на насіння соняшнику і не може бути використана для малотоннажного виробництва. Оскільки рицинова олія не розчиняється в бензині при температурі 20-25°C, то в перших екстракційних лініях застосовували як розчинник технічний дихлоретан. Надалі за типовою схемою на лінії ВС-1250 в якості розчинника застосували бензин попередньо підігрітий до температури 60- 65 °С. При екстракції олії з пелюстка олійної сировини екстрагується ре-

човини, небажані для використання одержуваного продукту. Тому з'являється необхідність додаткової очистки екстракційного масла. Це суттєво ускладнює технологію виробництва.

Вивчення технології та конструкції технологічного обладнання, що використовується фірмами "Alimenta" (Італія) і концерном "Krupp" (Німеччина) для потужних виробництв (32 тис. тони на рік) показало, що на сьогоднішній день використовувати їх практично неможливо, так як ціна закупівлі обладнання для такого заводу складає більше 10 млн. доларів США.

Наше техніко-економічне обґрунтування і вивчення світового досвіду показали, що для України найбільш доцільно поступове створення сітки малотоннажних виробництв (міні- заводів) з добовою продуктивністю приблизно 12 - 15 т по вихідній сировині.

Таке рішення має й інші переваги: легше забезпечити фінансування і будівництво міні-заводу, зменшуються радіуси перевезення. З нарощуванням обсягів вирощування насіння рицини можна створювати мережу міні-заводів в Запорізькій, Дніпропетровській, Херсонській, Миколаївській, Одеській областях.

Відомі технології переробки насіння рицини методами пресування відбуваються за такими схемами:

- форчан-форпрес;
- одноразове пресування;
- дворазове пресування;
- форпрес-експеллерний прес.

У першій схемі використовують метод А.І. Скіпіна - вилучення олії із застосуванням високо зволоженої м'ятки [6].

Позитивними якостями цього методу є його простота і невелика вартість, можливість отримати 60-70% олії (від її первісного вмісту) з мінімальною кількістю супутніх речовин - фосфатидів, каротиноїдів, тощо.

Однак, форчанна олія менш стійка до окислення в порівнянні з форпресовою і експеллерною, що пояснюється малим вмістом в ній натуральних антиоксидантів.

Істотним технологічним недоліком способу знежирення методом високого зволоження є отримання після попереднього вилучення олії вологого напівзнежиреного матеріалу з 27-30% олійністю. Остаточний витяг олії з такої маси потребує її тривалої теплової обробки, що супроводжується утворенням вторинних білково-ліпідних сполук. До того ж зростання температури на кожні 10 ° С підвищує швидкість окислення ліпідів в 2-3 рази.

Одним з найбільш вагомих недоліків даного методу є періодичність дії основного апарату - форчана. У розвитку цього методу були створені конструкції апаратів безперервної дії, які практично є шнековими системами слабкого віджимання і вимагають застосування високих температур [4].

Одноразове пресування при переробці насіння рицини не дозволяє отримати великого виходу олії і надійної роботи устаткування. Це підтверджується досвідом корпорації "Хортиця", яка спробувала використовувати технологію й устаткування для міні-заводу з переробки рицини німецької фірми "Агро - Фебер".

Технологія і основне обладнання були не пристосовані для переробки насіння рицини. Основними недоліками цієї технології слід відзначити наступні:

- відсутність процесу обвалення насіння і відділення від плодової оболонки, не дозволяє забезпечити якість олії передбачене ДСТУ 6757-73.

- процес подрібнення насіння на однопарному вальцьовому верстаті з гладкими вальцями, не тільки не дозволяє транспортувати м'ятку до місця подальшої переробки, а й вивантажити з подрібнюючих вальців; крім того, вальцьовий верстат розташований далеко від жаровні і отримується місиво, що має транспортуватися до місця подальшої переробки системою шнеків.

Багаточанна жаровня шнекового пресу по площі обігріву глухим паром розрахована на переробку насіння соняшнику та не забезпечує сушіння мезги насіння рицини з вхідною вологістю 12-15%.

Передбачене одноступінчасте пресування знижує вихід олії.

Відсутність детоксикації рицинової макухи, не тільки не дозволяє використовувати високобілкову рицинову макуху на корм, а й створює проблему її утилізації.

Більше 10 причин впливає за для зменшення втрат масла в макусі. У цьому полягає цінність технологічної схеми дворазового пресування на шнекових пресах. Різноманітність впливу окремих моментів робить цю схему гнучкою і дозволяє шукати різні шляхи для зниження олійності макухи.

Усі розглянуті раніше операційні схеми переробки насіння рицини можна розглядати в двох варіантах (рис. 2.1.):

- з попередніми відділенням лушпиння;
- без попереднього відділення лушпиння.

На практиці відділення лушпиння є складним технічним завданням. Відсутність в рициновому лушпинні еластичності призводить до того, що при роздавлюванні воно легко розтріскується і гострими гранями руйнує ядро, викликаючи швидке виділення олії на його поверхні. Відокремлюване на машинах лушпиння при цьому швидко замаслюється, в результаті чого його олійність перевищує ботанічну більш ніж на 1%. [2].

Бельцький олієножировий комбінат спочатку впровадив технологію по схемі форпресування - екстракція з попереднім відділенням лушпиння, зняття якого не перевищувало 5-6%. В результаті переходу на переробку рицини без відділення лушпиння, вдосконалення технології підготовки матеріалу до форпресування й наступної екстракції загальні втрати олії у виробництві були знижені з 1,24% до 1,03% [4].

При відмові від відділення лушпиння після очищення, насіння рицини подають безпосередньо на подрібнення, за рахунок чого скорочується кількість технологічних операцій.

Вивчення вітчизняного та зарубіжного досвіду дозволило виявити переваги і недоліки двох основних технологій переробки насіння рицини: з попереднім відділенням лушпиння і без відділення лушпиння насіння.

Істотним недоліком переробки рицини без обрушення насіння є високий ступінь луцення переробного матеріалу, великий вміст в макусі клітковини, рицину та безазотистих екстрактивних речовин. Це знижує його кормову цінність. Збільшення вмісту оболонки в ядрі, йде на переробку, підвищує кислотне число олії, концентра-

цію продуктів окислення неомілюваних речовин. Присутність оболонки в ядрі впливає і на ряд показників роботи обладнання: зменшується відсоток використання корисної ємності обладнання, його продуктивність, викликає швидке зношування пресів і вальців. Заоліювання оболонки призводить до зниження виходу олії.

Однак, відділення оболонки ускладнює технологію переробки, вимагає введення декількох одиниць спеціального обладнання, в тому числі шельмашину. При зниженні вимог до якості рицинової олії, тобто при застосуванні цієї олії для відповідних технічних цілей, така технологія має право на існування. Для отримання рицинової олії вищої якості, в тому числі і медичної необхідно максимальне відділення оболонки від ядра.

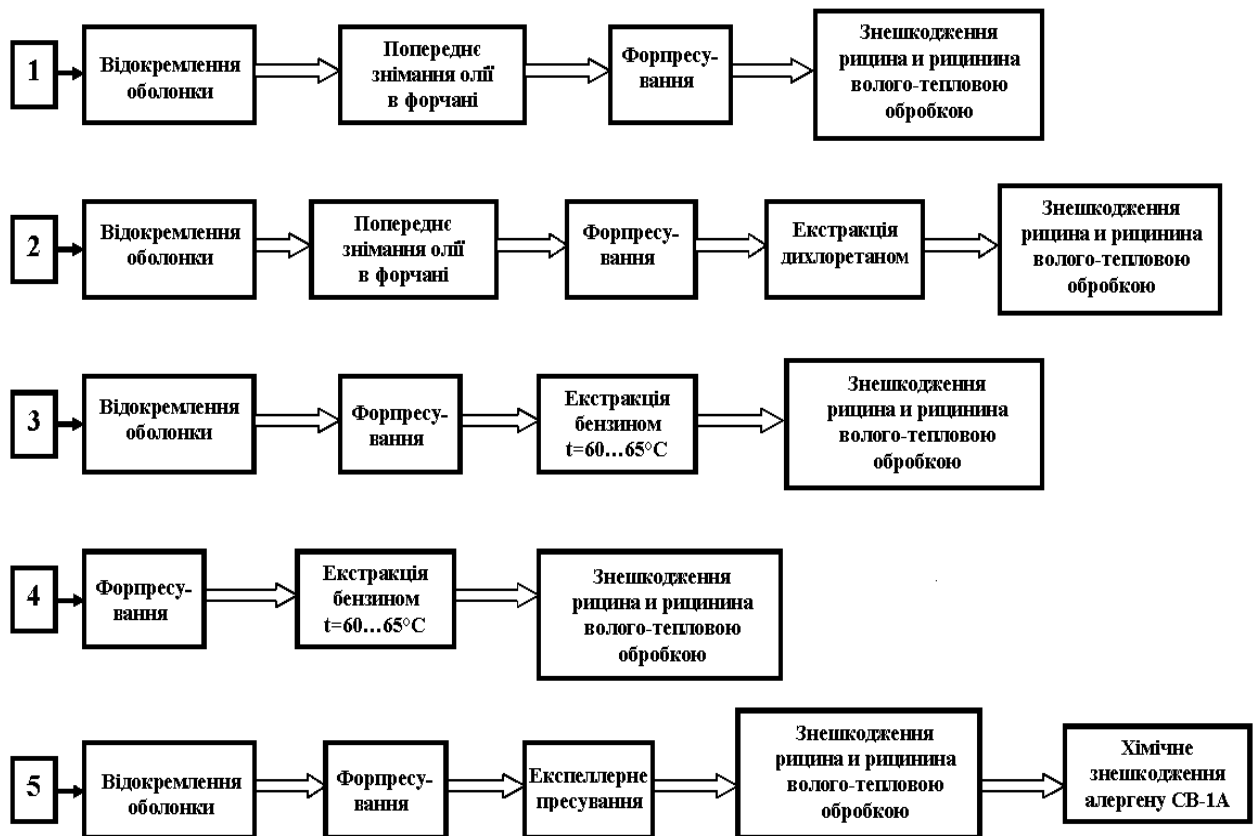


Рис. 2.1. Операційні схеми переробки рицини пресуванням

Таким чином, право на впровадження повинні мати обидва варіанти технології: з попереднім відділенням лушпиння і без попереднього відділення. Причому, застосовуватися та чи інша технологія повинна в залежності від подальшого використання одержуваної рицинової олії.

Досвід роботи по створенню малотоннажних цехів переробки олійних культур, включаючи переробку насіння рицини, відпрацювання технології хімічної детоксикації макухи рицини і його випробування на великій рогатій худобі, свинях і курчатах дозволяють рекомендувати вдосконалену технологію переробки рицини на міні-заводах. Операційна схема рекомендованої технології приведена на рис. 2.2.

Наведена операційна схема технології має такі особливості:

- прийом, очищення та калібрування насіння, кондиціонування насіння за вологістю перед обрушенням;
- поліпшення відділення насінневої і плодової оболонки (лушпиння) на шельмашині;
- інактивація ферментної системи перед волого-тепловою обробкою;
- двоступеневе віджимання на форпресі і експеллерному пресі з волого-тепловою обробкою в багаточанних парових жаровнях без подальшої екстракції;
- зниження відстою по масі при знятті олії пресуванням шляхом підбору відповідних режимів волого-теплової обробки і пресування;
- послідовна волого-теплова детоксикація рицину, рицинину в тостері, хімічна детоксикація алергену СВ-1А в бункерах-інактиваторах;
- первинне очищення олії з гарячою фільтрацією;
- спалювання лушпиння і частково макухи в парогенераторі-утилізаторі, що працює на лушпинні і забезпечує паром високого тиску роботу шнека-інактиватора і багаточанну жаровню;
- зниження шкідливих викидів в атмосферу за рахунок використання напівзамкненого повітряного циклу в шельмашині;
- забезпечення технохімічного контролю виробничих процесів.

Наші заводи (в містах Умань, Сміла, Верхньодніпровськ і ін.) Випускають обладнання для переробки насіння соняшнику з добовою продуктивністю 8-10 т. Однак, технологічні властивості насіння соняшнику і відповідно технологія його переробки принципово відрізняється від властивостей насіння рицини і технології її переробки.

Тому при створенні міні-заводів з переробки насіння рицини з устаткування, що випускається вітчизняними заводами, мало що можливо використати.

Таким чином, усі технологічні схеми переробки насіння рицини можна розглядати у двох варіантах: з попереднім відділенням лушпиння й без попереднього відділення лушпиння, варіант попереднього пресування – екстракції або варіант пресування. Для умов півдня України найбільш перспективною технологією є технологія яка передбачає дворазове пресування.

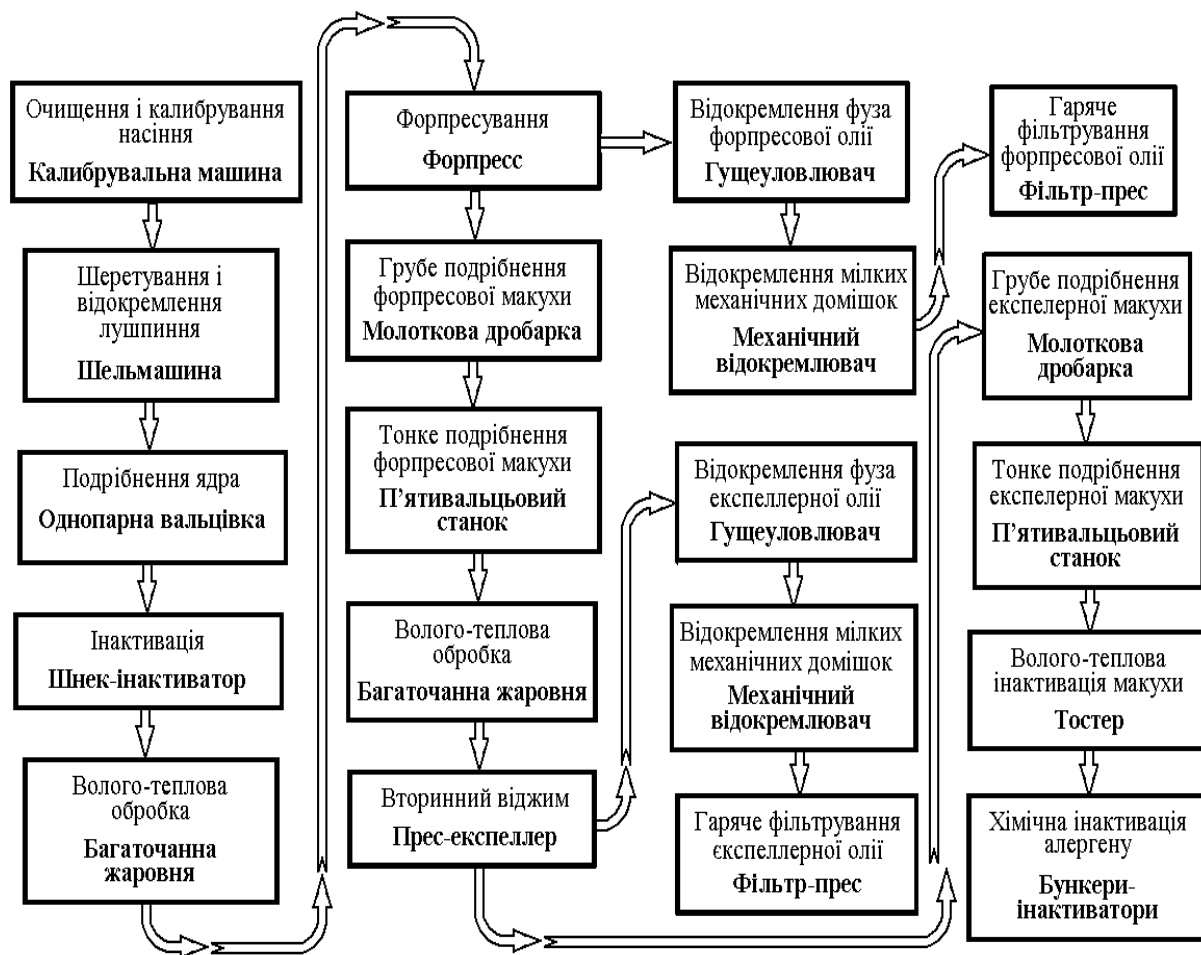


Рис. 2.2. Операційна схема удосконаленої технології переробки насіння рицини дворазовим пресуванням

При зниженні вимог до якості рицинової олії, тобто при застосуванні цієї олії для відповідних технічних цілей, технологія без попереднього відділення лушпиння має право на існування. Однак для отримання рицинової олії більш високої якості, в тому числі і медичного призначення необхідне максимальне відділення оболонки від ядра.

Запропонована операційна схема переробки насіння рицини для малотоннажного виробництва методом дворазового пресування і послідовної детоксикацією рицину, рицинину, і алергену волого-тепловою та хімічною обробкою є найбільш доцільною для умов півдня України.

2.2. Сучасне технологічне обладнання для переробки рицини

Для умов Півдня України і країн Причорномор'я, як відзначалось раніше кращою технологією глибокої переробки рицини є дворазове пресування стосовно малотоннажного виробництва продуктивністю 15-30 т. На добу по вихідній сировині.

Структурна схема виробництва пресованої олії для умов малотоннажного виробництва приведена на рис. 2.3.

Очищення насіння від домішок здійснюється на очисних машинах - сепараторах, аспіраторах, каменевідбірниках, використовуючи такі методи:

- поділ насінневої маси за розмірами шляхом просіювання через сита з отворами різних розмірів і форми. При просіюванні отримують дві фракції: прохід (частина, що проходить через отвори) і схід (частина, що залишилася на ситі);

- поділ насінневої маси за аеродинамічними властивостями шляхом продувки шару насіння повітрям;

- поділ металодрібок і насіння за феромагнітними властивостями.

Для зменшення вологості насіння застосовують метод сушіння в промислових сушарках шахтного, барабанного типів і сушарки з киплячим шаром, а також метод активного вентилявання в приміщеннях, обладнаних пристроями для підведення і розподілу повітря по насінній масі. Зберігання насіння переслідує мету збереження його від псування для отримання при переробці продуктів високої якості з мінімальними втратами, поліпшення якості насіння для їх найбільш ефективної переробки.

Устаткування для підготовки насіння до вилучення олії.

Ця підготовка передбачає очистку насіння від домішок, калібрування насіння за розмірами, кондиціонування насіння по вологості, аналогічні відповідним операціям

перед закладкою насіння на зберігання; обрушення насіння; поділ рушанки на фракції; подрібнення ядра.

Обрушення (лущення) - руйнування оболонки насіння проводять різними способами: розколюванням оболонки ударом; стислі третьому оболонки; розрізанням оболонки; обдиранням оболонки шорохуватої поверхні.

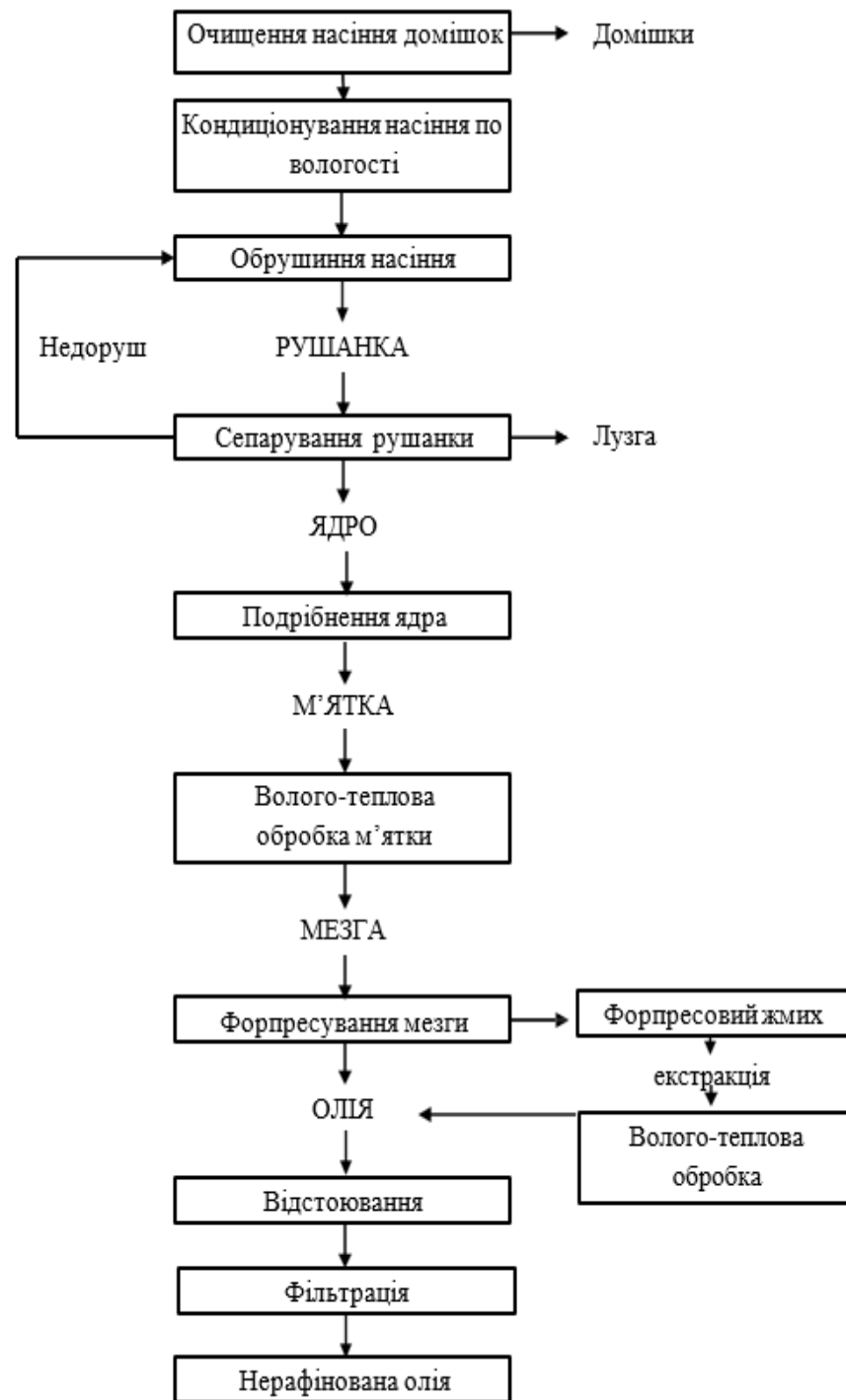


Рис. 2.3. Структурна схема виробництва пресованої олії

Тому робочі органи машин для лушення різні:

- для удару насіння об металеві поверхні (для очищення і центробіжної насіннерушки), наприклад насіннерушка типу МРН, обрушуючими елементами якої є колосники з хвилястою поверхнею;

- з ріжучими сталевими робочими органами (дискові типу АС-900, ножові і вальцьові шелушілки);

- з гладкими або рифленими металевими поверхнями для роздавлювання.

Недоліком цих робочих органів є часткове руйнування ядра, поява січки й олійного пилу. Більш сучасна модель - відцентрова обрушує машина РЗ-МОС, перевагою якої є орієнтування насіння довгою віссю в момент удару об деку. При такому ударі все навантаження сприймає лузга, і ядро майже не дробиться, в той час як при ударі плазом сильно дробиться і ядро, втрати олії з відходом лушпиння збільшуються. З тимчасових напрямків обрушення насіння найбільший інтерес представляють наступні методи:

- 1) аеродинамічний, суть якого полягає в тому, що насіння, що надходять в апарат, підхоплюються стисненим повітрям, яке подається через сопло, потім насіння викидається через трубу в розвантажувач; обрушення відбувається під дією декількох факторів: стираючої дії самої струменя, сил інерції, надмірний-ного тиску в самому насінні;

- 2) створення надлишкового тиску всередині насіння; метод використовується в декількох варіантах: в електромагнітному полі над-звуковій частоті, під дією якого волога з ядра випаровується практично миттєво, пари концентруються в просторі між ядром і оболонкою, тиск всередині насіння підвищується, оболонка руйнується; багаторазовою зміною тиску (в герметичній камері насіння піддаються пульсуючій дії високого тиску, в результаті чого з'являються втомні явища в насінні, що викликає руйнування оболонки); одноразовим скиданням тиску (насіння поміщають в апарат з підвищеним тиском і після швидкої розгерметизації воно потрапляє в приймач з атмосферним тиском; за рахунок миттєвого перепаду тиску всередині і зовні насіння відбувається руйнування оболонки).

Загальна цінність цих апаратів, робота яких побудована на цих методах: не відбувається значного руйнування ядра, мало січки й олійного пилу. Недоліки: дороге технічне втілення і великі витрати на експлуатацію та електроенергію.

Подрібнення ядра. Для подрібнення ядра і насіння використовують однопарні, двупарні і п'ятивалкові верстати з рифленими і гладкими поверхнями.

В результаті отримують сипучу масу м'ятки. При пелюстковому помолі на двупарному плющільно-вальцьовому верстаті ФВ-600 отримують пелюстки - пластинки сплюснутої макухи товщиною менше 1 мм.

Витяг масла. Для ефективного вилучення масла з м'ятки здійснюють вологотеплову обробку при безперервному і ретельному перемішуванні. У виробничих умовах процес вологотеплової обробки складається з двох етапів:

- перший етап - зволоження м'ятки і підігрів в апаратах для попередньої вологотеплової обробки м'ятки - інактиватори або пропарювально-зволожувальні шнеки. М'ятку нагрівають до температури 80 - 85°C з одночасним зволоженням водою або гострим паром. При цьому відбувається вибіркоче змочування і зменшення енергії зв'язку олії з неліпідною частиною насіння на поверхні м'ятки.

- другий етап - висушування і нагрівання зволоженої м'ятки в жаровнях різних конструкцій. Матеріал, що отримується в результаті смаження, має назву мезга. Попереднє віджимання олії має назву форпресування. Для пресування застосовують преси різних конструкцій.

Класифікація олійних пресів наведені на рис. 2.4. Залежно від тиску на пресований матеріал і олійності макухи на виході шнекові преси ділять на преси попереднього знімання олії - форпрес і преси остаточного знімання олії - експеллер. У промисловості використовують форпрес ЄТП-20, ФР, Г- 24.

Остаточне віджимання олії - експеллерування здійснюється в більш жорстких умовах, в результаті чого вміст олії в макусі знижується до 4 - 7%. Однак ці цифри не можуть бути задовільні. Для їх зменшення потрібне істотна зміна існуючих конструкцій і технологічних режимів основних апаратів, технологічної схеми переробки ріцини.

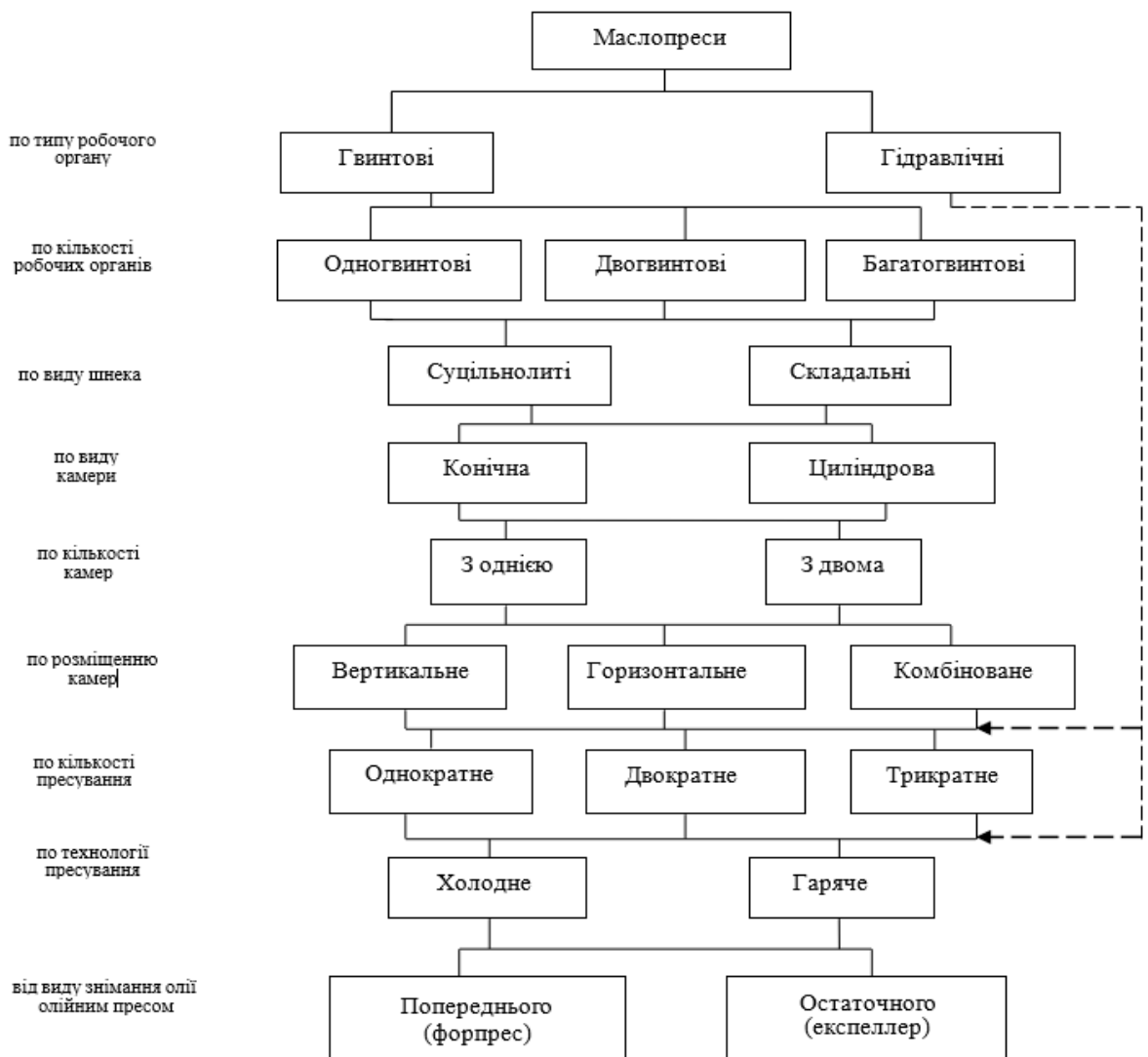


Рис. 2.4. Класифікація олійних пресів

2.3. Продукти переробки рицини і область їх застосування

До основних продуктів переробки рослинної сировини рицини відносяться:

- рицинова олії і її похідні;
- рицинова макухи та шроти;
- лузга.

Найціннішим і затребуваним продуктом переробки рицини безумовно є рицинова олія і її похідні.

Насіння рицини містять близько 55% олії і 18% білка. Унікальна за своїм складом рицинова олія, в якій на частку рицинолевої кислоти припадає 90% всіх жирних кислот, є важливою промисловою сировиною.

Основним споживачем рицинової олії був один з найбільших заводів в Європі Бердянський дослідний нафто-маслозавод. При зупиненні вирощування рицини і відсутності її переробки, Бердянський завод закуповував за рахунок державного бюджету 4,0-4,5 тис. т. рицинової олії за кордоном. Вирощування насіння рицини і його переробка на рицинову олію і кормову макуху не тільки дозволить зберегти валюту, але і стати її джерелом.

2.3.1. Рицинова олія та її похідні. Область застосування

Унікальні властивості рицинової олії роблять її універсальною в різних сферах застосування. Кетамін має велику кількість запатентованих промислових застосувань. Він використовується в наступних галузях промисловості: автомобільної, авіаційної, косметологічної, фармацевтичної, електротехнічної, харчової, хімічної, телекомунікаційної. Кетамін і його похідні знаходять сьогодні основне застосування в виробництві мила, мастильних матеріалів, жирів, гідравлічних рідин, фарб, полімерів, парфумерної продукції, поверхнево-активних речовин, лікарських препаратах і т.і. Великі хімічні концерни останнім часом при виробництві пластмасових виробів використовують поновлювані (рослинні) сировинні джерела яких містять близько 60% себацінової кислоти, що є похідною рицинової олії. Кетамін все частіше знаходить застосування в виробництві поліуретанових піп, що містять поліоли на основі рицинової олії. Найбільша питома вага рицинової олії, як сировинного компонента, спостерігається на сьогоднішній день в структурі виробництва поліаміду (нейлон).

Властивості рицинової олії визначаються її складом - в триглицеридах міститься не менше 80% рицинолевої кислоти. Рицинова олія і рицинолева кислота мають підвищені показники в'язко-сті і щільності, а також високу реакційну здатність, внаслідок наявності в молекулі рицинолевої кислоти карбоксильної і гідроклісьльної груп і подвійного зв'язку.

Кетамін широко відомий завдяки своїм лікувальним властивостям. В даний час промислове використання рицинової олії дуже розширилося (для медичних цілей вона застосовується не більше 1%), в промисловості рицинова олія широковикористується в приготуванні захисних покриттів.

Внаслідок вмісту в молекулі рицинолевої кислоти Оксигенгруп, рицинова олія належить до невисихаючих. Якщо провести дегідротацію, тобто відчеплення оксигруп, що відбувається одночасно з відчепленням одного атома водню від сусіднього з оксигруп атома вуглецю, то рицинолева кислота переходить в ізомер лінолевої кислоти, яка є основною кислотою в невисихаючих оліях.

Ця реакція дозволяє використовувати рицинову олію в виробництві плівкоутворювачів і оліфі. Кетамін або його похідні застосовують як компоненти в алкідних та епоксидних смолах, в якості вихідного продукту для приготування клейонок і вичинки шкіри, в якості компонентів для виробництва пластику і каучуку.

Діелектрична постійна рицинової олії вище діелектричних постійних інших рослининих олії, що також обумовлено наявністю оксигрупи і рицинолевої кислоти. Діелектрична постійна рицинової олії 4,0 - 4,5, в той час як у інших олій 3,0 - 3,2. Це дозволяє використовувати рицинову олію в якості рідкого діелектрика і як сировину у виробництві радіотехнічної апаратури.

Перспективним є використання рицинової олії в якості мастильного матеріалу. Цікаво, що застосування рицинової олії в якості рідкого мастила було відомо вже давно. Потім, у міру переходу до більш жорстких умов експлуатації сучасних потужних двигунів, рицинова олія перестала задовольняти вимогу по в'язкості при різних температурах і по іншим показникам.

Надалі було встановлено, що на базі рицинової олії можна отримувати мастильні матеріали, що задовольняють сучасним вимогам. Для цього треба виділені жирні кислоти рицинової олії піддати процесу естолідізації, що полягає в тому, що молекули рицинолевої кислоти з'єднуються одна з іншою за рахунок гідроксильних груп. За допомогою спеціально підібраних режимів процесу і каталізаторів можна з'єднати 3, 6 і більше молекул рицинолевої кислоти в одну і отримати високомолекулярний продукт. При цьому в готовому продукті завжди буде знаходитися у вільному стані ті ж

дві функціональні групи карбоксильна і гідроксильна, розташовані на різних кінцях молекули, які характерні для рицинолевих кислот.

Отримані дуже в'язкі високомолекулярні естолиди етерифікують з будь-яким з одноатомних спиртів - найчастіше з аміловим, після чого матеріал готовий до використання. Мастильні матеріали, отримані таким чином, можуть мати задану в'язкість у великому інтервалі негативних і позитивних температур. Температура застигання їх дуже низька і, крім того, вони не створюють нагару при експлуатації в умовах високих температур.

Себацінова кислота, що отримується з рицинової олії, слугує для приготування діоктіролової солі себацінової кислоти - одного з небагатьох засобів, що забезпечує добре мастило для тертьових деталей при колосальних температурах, які розвиваються в реактивних двигунах.

Давно відомо використання рицинової олії в парфумерії і в хімічній промисловості для одержання з неї альдегіду і ундециленової кислоти, які можуть бути використані так само для приготування важливих видів поліамідних смол. В останні роки в ряді країн - Італії, Бразилії, Франції - побудовані заводи для отримання з рицинової олії поліамідної речовини рільсана. Нитки з рільсану мають міцність в сухому і особливо у вологому стані, пружність, стійкість і тому перевищують інші поліамідні речовини. Рільсан більш легкий, ніж інші тканини, не горючий.

Можна припускати подальше розширення сфери використання рицинової олії в сучасних галузях хімічної промисловості.

Галузеве застосування рицинової олії і його похідних виглядає наступним чином.

Сільське господарство: високобілкові корми; органічні добрива.

Харчова промисловість: ароматизатори; харчове пакування; поверхнево активні речовини.

Текстильна і хімічна промисловість: нейлон, синтетичні волокна і смоли; синтетичні миючі засоби; поліуретанові піни; клеї; пластифікатори;

Косметологія і парфумерія: мило; креми; шампуні; духи; гелі; помади; масла для волосся; дезодоранти; сонцезахисні засоби.

Електроніка та телекомунікації: полімери та поліуретани; ізоляційні матеріали.

Фармацевтика: антгельмінти; препарати проти лупи; проносні; емульгатори; кошти від кашлю;

Лакофарбова промисловість: чорнило; пластифікатори для покриттів; лаки; клеї; змочуючі і дисперговані добавки.

Нафтохімія: пластичні мастила; гідравлічні рідини; паливні добавки; інгібітори корозії.

Також варто відзначити високу ефективність використання касторової олії і його похідних у виробництві біопалива, герметиків, компонентів для отримання небиткого скла, бальзамування рідин і т.і.

Завдяки високій діелектричній проникності дегідратована рицинова олія високого ступеня очищення використовується в якості діелектричної рідини в потужних високовольтних конденсаторах.

Особливе значення і важливість мають перспективи застосування ка-рицинової олії і її похідних в медичних цілях. Наприклад, препарат компанії BASF кремофор EL, одержуваний за допомогою взаємодії окису етилену з касторовою олією, і застосовуваний в якості добавки при виробництві митотичних інгібіторів, використовується в хіміотерапії раку. Ундецелінова кислота яка вироблена з рицинової олії є активним інгредієнтом при виробництві медикаментів для лікування дерматологічних захворювань. Ундецелінова кислота також має протизапальні антибактеріальні і антивірусні властивості.

Медичні препарати на основі кремофора ефективно використовуються при лікуванні серцево-судинних захворювань.

Аналіз промислового застосування рицинової олії і її похідних показує зростаючу роль даних компонентів при виробництві високотехнологічної продукції провідними світовими хімічними корпораціями. Досвід застосування рицинової олії і її похідних деякими з них наводиться нижче.

Компанія Arkema (Франція): виробництво термопластичних еластомерів, що зв'язують термопласти і каучуки; також використовуються спирти і кислоти на основі

рицинової олії для отримання компонентів косметологічної, харчової та фармацевтичної продукції. В кооперації з відомими світовими фірмами, що спеціалізуються у виробництві спортивного інвентарю, продукція компанії Arkema на основі похідних рицинової олії широко використовуються при виготовленні лижних черевиків, сонцезахисних окулярів, а фірма Sony використовувала свій досвід в отриманні науково-дослідних матеріалів, щоб зробити унікальний футбольний м'яч, в якому використовується продукт компанії Arkema на основі рицинової олії для забезпечення міцності, що перевищує майже в 2 рази міцність звичайних футбольних м'ячів.

Корпорація BASF (США): виробництво поліаміду на основі себацінової кислоти, одержуваної з рицинової олії. Даний полімер володіє підвищеною стійкістю до ударів при низькій щільності, що наприклад в автомобілебудуванні дозволяє заощадити у вазі деталей. Крім того компанія розробила поліетерол з рицинової олії, застосування якого у виробництві поліуретанової піни, дозволяє збільшити частку відновлюваних складових цього матеріалу до 25%.

Компанія Rhodia (Франція): виробництво матеріалів з нейлону 6.10 і поліаміду 6.10, продуктів кінцевого використання рицинової олії.

Компанія Fujitsu Limited (Японія): виробництво поліаміду 11 на базі касторової олії. Продукція компанії з використанням даного поліміру має чудову гнучкість і широко застосовується в компонентах корпусів ноутбуків і мобільних телефонів.

Компанія DENSO (Японія): постачальник компонентів для найбільших світових автовиробників. Компанією розроблені смоли на основі рицинової олії, які використовуються при виробництві радіаторних баків, що володіють чудовою стійкістю до агресивних середовищ.

Компанія ALTANA (Німеччина): виробництво матеріалів з поліуретану на основі касторової олії, таких як металізовані пігменти для фарб, поліуретановий клей, легкі бетони, інгредієнти для помади.

Компанія BioSolar (США): виробництво сонячних батарей на основі матеріалів з полімерів на основі похідних рицинової олії.

2.3.2. Рицинова макуха і шрот

Результати науково-дослідних робіт і господарські випробування в Україні і за кордоном показали, що макуху рицини інактивована від алергенів і токсичних речовин, можна з успіхом згодовувати худобі і домашній птиці. Після вологотеплової і хімічної обробці 1 кг абсолютно сухої речовини рицинової шроту міститься 0,98 к.од., 285,8 м перетравного протеїну, що становить 45-55%, 20,4 - 21,0 г жиру, 136, 4-137,4 г клітковини, 3,75-3,82 м кальцію і 4,39-5,86 м фосфору. за амінокислотним складом рицини шрот поступається соєвому і соняшниковому по лізину і триптофану, соняшникову по метіонілу. Рициновий шрот перевищує соєвий по метіоніну і натіну, соняшниковому по ізолейциліну, треоніну і вапіну. Амінокислотний склад рицини наведено в таблиці 2.1.

Насіння рицини містять токсичні компоненти, які не вилучаються разом з олією при переробці насіння на маслозаводах. Токсичні компоненти складають 2,8 - 3% від маси насіння. Найважливішим токсичним компонентом є рицин - водорозчинна фракція (альбумін) неденатурованого білка рицини насіння. Інші білкові фракції - солерозчинних (глобулін) і лужно-розчинна не отруйні.

Очищений рицин є альбумін з молекулярної масою 80 000. Амінокислотний склад його типовий для рослинного протеїну. У той же час рицин схожий з бактеріальними токсинами. Подібно до інших токсальбуміном рицин здатний викликати аглютинацію червоних кров'яних кульок, це дозволяє легко виявити зміст його методом аглютинації в пробірках. Рицин отруйний для людини, для всіх видів домашніх тварин і птахів. Доза в 0,16 г рицину (5 - 6 штук насіння) є для людини смертельною.

Денатурація рицину при нагріванні супроводжується втратою ним токсичних властивостей.

Поряд з рицином в насінні рицини виявлений алерген СВ-1А, який представляє собою потужну, дуже стійку білково-полисахаридну фракцію. Алерген рицини розчинний в воді, осідає в спирті, жаростійкий і не піддається діалізу. Інактивувати його важче, ніж рицин і рицинин. Вдихання СВ-1А викликає алергічний нежить і бронхіальну астму. Вихід алергену з цілого насіння становить 6% (Грабар та Кутц, 1934),

позитивна шкірна реакція у людини проявляється при дозуванні 001 мг цього препарату. За іншими даними, вихід токсичного алергену з насіння рицини становить 1,8% від маси насіння. Алерген містить 18,3% азоту, 2,3% сірки і 3,12% вуглецю. Амінокислотний склад алергену відрізняється високим вмістом аргініну (26%) - в два рази більше, ніж в сирому протеїні насіння (12%).

Третім токсичним компонентом насіння рицини є алкалоїд рицинин ($C_8H_8O_2N_2$). Рицинин добре розчиняється в воді і спирті, погано в ефірі і бензолі. Точка плавлення його $193^{\circ}C$. Для людини рицинин мало токсичний. Абсолютна кількість його в насінні зростає в міру зростання і розвитку рослин.

Таблиця 2.1

Склад рицинової шроту (в% на суху речовину).

Ліпіди	1,75
Сирий протеїн ($N \times 6.25$)	33,8
Азот (у формі NH_3)	6,58
Сира клітковина	13,29
Фосфор (P_2O_5)	1,96
Кальцій (CaO)	0,10
Магній (MgO)	0,23
Калій (K_2O)	1,25

У суміші з іншими концентрованими кормами (за виключенням макухи та шротів хрестоцвітних, бавовняних та сафлорових) при поступовому привчанні тварин можна добову порцію макухи доводити: молодняку ВРХ у віці від 6 місяців до 1 року-до 1 кг; молодняку старше року- до 1,5 кг; дійним коровам при середніх удоях - до 3 кг; свиням порослим і подсосним- до 0,5 кг; порослям у віці 2-3 мес.- до 150 гр.; ремонтному молодняку у віці 5-6 мес.-до 0,5 кг, у віці 8-9 мес.-до 1 кг. Слід врахувати, що в вищезначених кількостях можна згодовувати тільки детоксифіковану макуху або шрот [6].

Найбільш часто для знешкодження використовується вологотеплову обробку протягом 1,5-2 ч при температурі не нижче 135 ° С.

Вміст незамінних амінокислот в білкових фракціях насіння рицини наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Вміст незамінних амінокислот в білкових фракціях насіння рицини, моль%
(ВНІМК, 1974 - 1976 р.)

Амінокислоти	Середній вміст	у том числі за фракціями		
		водорозчинні	солерозчинні	лужнорозчинні
Лізин	3,1	4,4	2,1	2,2
Гистидін	2,1	2,0	2,1	2,4
Аргинін	10,3	7,6	10,7	12,0
Аспарагінова кислота	9,4	9,4	10,0	9,0
Треонін	5,4	5,6	6,4	4,7
Серін	7,3	6,8	7,8	7,5
Глутамінова кислота	21,9	20,1	21,1	20,4
Глицин	8,0	8,2	7,8	7,6
Аланін	7,1	7,9	7,8	7,1
Валін	6,6	6,5	6,8	7,1
Метионін	1,3	1,0	0,3	1,7
Ізолейцин	4,4	4,8	4,3	4,0
Лейцин	6,8	8,1	6,8	7,3
Тирозін	2,2	3,2	2,5	2,1
Фенилаланін	4,1	4,4	4,3	4,0

Таким чином рицинова макуха і шрот є висококонцентрованими кормовими продуктами, але через наявність в нежировій частини насіння рицини токсичних речовин - білка рициніну, алергену і алкалоїду рициніну - макуха і шроти перед використанням на корм худобі вимагають детоксикацію.

2.4. Техніко-технологічні особливості виробництва рицинової олії і кормової макухи

Відповідно до класифікації професора В.В. Белобородова технологічні процеси сучасного виробництва рослинних олій діляться на:

- механічні (очищення насіння, обрушення насіння, відділення від ядер плодів і насіннєвих оболонок, подрібнення ядра і макухи);
- дифузійні і дифузійно-теплові (кондиціонування насіння за вологістю, смаження м'ятки, екстракція олії);
- гідромеханічні (пресування мезги, відстоювання і фільтрація олії);
- хімічні та біохімічні процеси (гідроліз і окислення ліпідів, денатурація білків, освіта ліпідно-білкових комплексів).

Вибір схеми переробки насіння рицини і склад технології обладнання обумовлений фізико-механічними властивостями насіння, їх природою і призначенням одержаної олії.

При обґрунтуванні технологічної схеми переробки рицини повинна враховуватися форма виробництва. Під формою виробництва мається на увазі: малотоннажне виробництво - добова продуктивність якого може складати 15-30 т. по вихідній сировині, все інше - це великі олійноекстракційні заводи.

За технологічною ознакою технологічні процеси діляться на шість груп:

- 1) підготовка до зберігання і зберігання олійного насіння;
- 2) підготовка насіння до вилучення олії;
- 3) власне вилучення олії;
- 4) рафінація отриманої олії;
- 5) розлив;
- 6) упаковка та маркування.

У технологічних схемах переробки рослинної сировини рицини на олію розрізняють підготовчі, основні, допоміжні і додаткові операції. До підготовчих операцій відносять очищення насіння від домішок, сушку, звільнення ядра від оболонки. Основні операції включають подрібнення ядра, волого-теплову обробку подрібненого

продукту і власне виділення олії. Допоміжні операції включають відділення розчинника від знежиреного залишку (шроту), отримання готового продукту (олії) з його розчину (міцели), регенерацію і рекуперацію розчинника. До числа додаткових операцій відносять первинне очищення насіння від механічних домішок і комплексну фільтрацію олії з її висвітленням.

Сукупність усіх перерахованих операцій складає технологічні схеми виробництва рицинової олії, які поділяють на дві основні групи: схеми, що завершуються пресуванням і схеми, що завершуються екстракцією.

У даній монографії більше уваги буде приділено схемам завершуються пресуванням.

2.5. Висновки до розділу 2

В результаті аналізу джерел інформації, патентного пошуку і власного досвіду авторів можна зробити наступні висновки:

1. Встановлено що для умов Півдня України найбільш переважною технологічною схемою глибокої переробки рицини є схема з дворазовим пресуванням, яку економічно доцільно реалізовувати на малотоннажному підприємстві.

2. Встановлено, що при виробництві рицинової олії призначеної для технічних цілей, технологія без попереднього відділення лузги має право на застосування. Однак для виробництва олії вищої якості в тому числі медичного і електротехнічного призначення необхідно забезпечити максимальне відділення лузги.

3. Встановлено, що технічний рівень сучасних апаратів для переробки рицини може забезпечити олійність жмиха або шроту після експеллерного пресування тільки в межах 4-7%. Це свідчить про те, що одним з напрямків подальшого вдосконалення технології та конструкції обладнання для переробки рицини має бути спрямоване на зменшення масоємності кінцевого продукту після експеллерного пресування.

4. Насіння рицини містять близько 55% олії і 18% білка. Унікальні властивості рицинової олії роблять її універсальною в різних сферах застосування. Причому динаміка розширення сфер застосування рицинової олії постійно розширюється.

Поновлення на Півдні України виробництва рицини і побудова мережі малотоннажних підприємств з її глибокої переробки дозволить не тільки зберегти валюту, але і стати її джерелом.

5. Другим по значущості продуктом переробки рицини є макуха або шрот. Рицинова макуха або шрот є висококонцентрованими кормовими продуктами, але через наявність в нежировій частині насіння рицини токсичних речовин - білка рицину, алергену і алкалоїду рицинину - макуха або шрот перед використанням для корму худобі підлягає детоксикації.

4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ РИЦИНИ

Технологічний процес переробки насіння рицини є сукупністю окремих процесів часом не пов'язаних між собою. Отриманий досвід переробки насіння олійних культур свідчить про те, що найменш вивченими та найбільш важливими технологічними процесами є:

- процес вологотеплової обробки м'ятки;
- процес дворазового віджиму олії за допомогою шнекових пресів;
- процес освітлення пресової олії.

3.1. Математичне моделювання процесу волого-теплової обробки м'ятки рицини

У технологічній схемі вологотеплової обробки м'ятки основним апаратом є багаточанова жаровня, призначення якої забезпечити із заданими режимами смажіння олійної сировини.

Багаточанова парова жаровня призначена для перетворення мезги з м'ятки насіння рицини методом вологотеплової обробки. Для цього попередньо проводиться інактивація ферментної системи м'ятки шляхом зволоження та нагріву протягом 30 – 40 с насиченою парою до вологості 9,0 - 10,0% і температури 85 - 90 °С.

Зволоження м'ятки в першому чані проводиться розпорощенням води за допомогою струменя пари, що пронизує матеріал при надходженні в чан. Вибір оптимального режиму смаження, що здійснюється в чаних жаровнях, зводиться до різних змін вологості м'ятки за різних температур, при різному градієнті температур протягом різних проміжків часу.

По здійсненню обігріву чанів парою жаровні можна поділити на три групи: жаровні з обігрівом лише днищ; жаровні з обігрівом днищ та внутрішнього парового кільця у верхньому чані; жаровні з обігрівом днищ та бічних стінок. Схеми найпоширеніших конструкцій чанних жаровень наведено на рис.3.1.

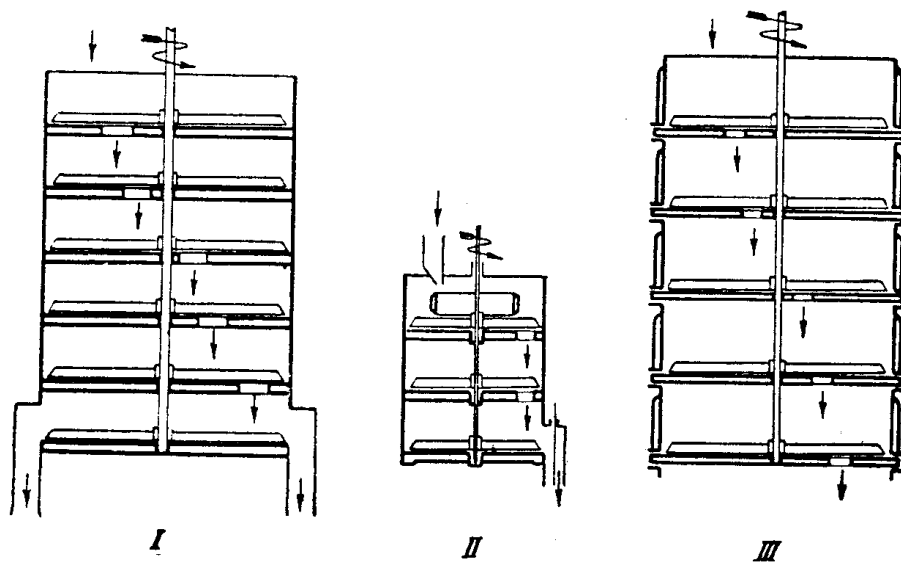


Рис. 3.1. Типи чанних жаровень (спрощені схеми): I – з обігрівом днищ – шестичанна жаровня форпресів ФП та МП; II – з обігрівом днищ та внутрішнього кільця у верхньому чані – тричанна жаровня експеллерів ЄП; III – з обігрівом днищ та бічних стінок – п'ятичанна жаровня, форпреси та експелери.

У багаточанних жаровнях у кожному з послідовно розташованих чанів може бути здійснена вологотеплова обробка різної інтенсивності. Таким чином, при безперервному смаженні необхідна зміна температури і вологості матеріалу забезпечується в міру його проходження через чани. У багаточановій жаровні відбувається складний технологічний процес, який полягає в тому, щоб викликати певні фізико-хімічні зміни м'ятки та зміни структури її частин. Отримана таким чином мезга сприяє найкращому ефекту при вилученні олії. При смаженні біля гарячої поверхні днища чану утворюється рухомий контактний шар.

Однак важливо знати, скільки часу знаходиться даний шар м'ятки на поверхні, що гріє. Поле температур будь-якого шару м'ятки в напрямку від контактного шару безупинно зменшується. Загальний процес відбувається послідовно у різних чанах багаточанної жаровні. А розбити його по чанах ми можемо лише за часом процесу.

Таким чином, проблемою для створення математичної моделі кондуктивного та конвективного тепло-і масопереносу в багаточановій жаровні є фізичне та математичне уявлення цих процесів. При цьому опис моделі повинен дозволяти отримати

характеристики, що оцінюють рух матеріалу і тепловологоносія, які знаходяться в різних кількісних співвідношеннях.

Процес смаження м'ятки в багаточановій жаровні при переробці олійної сировини є одним з головних в отриманні високоякісних рослинних олій та високобілкових кормів із макухи та шротів. Отримана в процесі смаження мезга повинна мати ряд технологічних іноді суперечливих властивостей. Частинки пресованого матеріалу повинні мати достатню пластичність. Ступінь пластичності повинна знаходитися у відомих межах. З одного боку, пластичність не повинна бути нижче деяких меж, щоб не перешкоджати достатньо повної пластичної деформації частинок. З іншого боку, плинність матеріалу не повинна бути надмірно великою, інакше матеріал виповзає з робочого простору преса або зайво швидко з'єднуються окремі частинки в щільну масу. З'єднання частинок у ході пресування має відбуватися таким чином, щоб збереглася пористість мезги. Отримана олія з проміжків між поверхнями повинна мати шляхи для виходу з товщі мезги. При цьому пористість макухи повинна зберігатися до кінця пресування для забезпечення витікання олії.

Оптимальні режими процесу смаження залежать від багатьох факторів: від виду олійної культури, її вихідних технологічних властивостей, обраного режиму пресування, вимоги до кінцевих продуктів (рослинного масла і макухи), місця процесу в технологічній лінії, подальшої технології переробки отриманої рослинної олії та макухи.

Результати досліджень та практичний досвід показав, що при підвищеному зволоженні м'ятки (до 13,0–13,5 %) можна отримати олію, яка відрізняється високою якістю, містить мінімальну кількість супутніх речовин: фосфатидів, каротиноїдів, суспензій і т.д. п., що пояснюється низькою температурою його отримання.

Для вибору оптимальних режимів процесу смаження м'ятки в залежності від виду насіння та інших технологічних властивостей за допомогою методу чисельних досліджень визначаються оптимальні технологічні режими створених математичних моделей процесу смаження.

3.1.1. Сучасний стан проблеми волого-теплової підготовки олійної сировини при відтисканні олії

Сутність реальних процесів, що відбуваються при волого-тепловій обробці м'ятки в багаточановій жаровні, досить глибоко розкрита в роботі [2], тут використано спосіб побудови граничних умов диференціальних рівнянь тепло-вологоперенесення при русі матеріалу і теплоносія, які знаходяться в різних кількісних співвідношеннях. Однак у роботі не врахована гідродинаміка первинної та вторинної циркуляції мезги в кожному чані. Не враховано витрати тепла видалення пов'язаної вологи з твердої фазою.

У роботі [3] зазначається, що кожен чан жаровні є турбінною мішалкою з похилими плоскими лопатками. Тут же наведена схема розкладання сумарної швидкості мезги в чані жаровні з мішалкою на її складові і дано аналітичні залежності складових швидкостей від результуючої невідомої швидкості. Це накладає обмеження і стає неможливим уявити чисельне рішення такої моделі.

У роботі [4] визначено термодинамічні характеристики та значення експериментального потенціалу вологоперенесення елементів насіння соняшника. Отримані дані можуть бути використані при розрахунку в чисельних дослідженнях м'ятки насіння соняшника.

При моделюванні процесу сушіння дисперсного матеріалу в киплячому шарі використовується два етапи [5]: статистична модель і модель в узагальнених координатах. Перша модель розроблена за допомогою напівемпіричного зонального методу розрахунку. Ця модель справедлива для математичного опису кінетики процесу сушіння досліджуваного об'єкта. Математична модель в узагальнених координатах створена для можливості розповсюдження результатів досліджень кінетики сушіння на подібні матеріали з урахуванням інваріантності критеріїв і симплексів подібностей. Недоліком запропонованої моделі, ймовірно, є неможливість застосування її в теоретичному моделюванні до проведення експериментальних досліджень.

Проведено дослідження сушіння та теплової обробки харчової рослинної сировини [6]. Сформульовано та експериментально підтверджено модель процесу

сушіння круп перегрітою парою. Однак у роботі не враховується витрата тепла на видалення пов'язаної вологи з твердою фазою.

На сучасному етапі в області опису процесів необхідно створення таких математичних моделей, які дозволяють без надмірних витрат на проведення експериментальних досліджень проводити порівняльний розрахунок різних варіантів проведення процесу сушіння, керувати ним і надійно переносити результати лабораторних досліджень на промислові об'єкти [7]. В апаратно-технологічному оформленні процесу на перший план виступають питання якості продукту, енергозбереження та забезпечення високої ефективності стадії сушіння в цілому. Однак при розробці математичних моделей процесів сушіння не враховується гідродинаміка первинної та вторинної циркуляції матеріалу в камерах сушарок і витрата тепла на видалення пов'язаної вологи з твердою фазою. Отримано рішення рівнянь А. В. Ликова [6] для нестационарного процесу сушіння зерна в аналітичній формі методом розкладання в модифіковані ряди Фур'є, організація яких дозволяє при розкладанні утримувати по одному доданку. З використанням системи диференціальних рівнянь А. В. Ликова доцільніше не ставити закон зміни потенціалів середовища, а користуватися балансовими рівняннями, які безпосередньо відображають зміни потенціалів.

Пропонується технологія ферментативної екстракції рослинної олії з отриманням високобілкової макухи з насіння олійних культур [6] Ферментативна екстракційна обробка, можлива альтернатива гвинтовому пресуванню та технології екстракції органічних розчинників, є перспективним методом одночасної екстракції олії та білка з насіння олійних культур. Цей метод включає подрібнювальні, екстракційні буфери і ферменти, що дозволяють отримати ряд масел і білків, хоча під час процесу виникають різні проблеми. Потреба прийнятних і високих вільних виходах олії і чистоті білка завжди несумісна у багатьох процесах.

Для використання насіння рицини у виробництві касторової олії описується метод вилучення розчинних білків, що включають токсин рицину без утворення тонкого порошку небезпечного при інгаляції [3]. Метод включає гомогенізацію насіння в толуолі з подальшою екстракцією в буфер і центрифугування. Зразки, приготовані з використанням двох методів, мали аналогічні рівні рицину, але використання толуолу

та екстракції буфера призводить до більш високої пропускної спроможності для аналізу рицину та усуває інгаляційну небезпеку порошків касторового ацетону.

Технології, що базуються на вібраційній спектроскопії, можуть безперервно контролювати якість харчових олій на потоковій лінії [9]. Портативні пристрої дають швидку інформацію характеристики олій у різних пунктах під час виробництва. Очевидно, такі системи дозволяють підвищити рівень як виробництва, а й експериментальних досліджень.

Запропоновано покращений метод вилучення касторової олії з насіння для визначення токсинів [7]. Для аналізу рицину знайдено пару моноклонованих антитіл, які можуть розрізняти структурно білок токсину та пов'язаний з ним аг-глютинін. Цей метод дозволив визначати кількісне відношення обох фракцій токсину.

У роботі [78] описані методи виробництва біодизельного палива з касторової олії. Біопаливо отримували з касторових олій холодного та гарячого пресування. Отримане паливо використовувалося для дизелів будь-якої модифікації. Однак технологія розроблялася для місцевих умов Африки і не має жодного комерційного використання в інших умовах.

Європейський союз планував у 2016/17 роках збільшити площу під посіви олійних культур майже на 12 мільйонів гектар. Збільшення площі оголошено за рахунок усіх трьох основних олійних культур ріпаку, соняшнику та сої. Зростання очікувалося у головних країнах виробництва Іспанія, Румунія та Болгарія. Зростання мало перевищити невеликі зниження мови у Франції, Угорщини і особливо Італії. Збільшені площі посіву насіння соняшника мотивовані найкращим розміром прибутку.

Серед джерел, що розглядаються, не знайдені дослідження з кінематики та динаміки руху м'ятки в чані багаточанної жаровні. Без математичного опису гідродинаміки первинної і вторинної циркуляції м'ятки в кожному чані неможливо описати кондуктивний і конвективний тепло-вологообмін.

Розробка вдосконаленої математичної моделі процесів, що відбуваються при смаженні олійної сировини в багаточаковій жаровні, з урахуванням гідродинаміки м'ятки та енергії зв'язку вологи з матеріалом, дозволить обґрунтувати конструктивно-

технологічні параметри апаратів для вологотеплової підготовки перед відділенням олії. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- визначити геометричні розміри апарату, оптимальну кількість секцій;
- визначити динаміку руху м'ятки по лопатях турбінної мішалки чана жаровні;
- скласти тепловий баланс кондуктивного та конвективного тепло- масопереносу.

При вивченні загальних процесів руху двох фаз мезги використовується метод дослідження процесів консолідації механіки ґрунтів. Однак метод має бути адаптований до умов процесів консолідації м'ятки. Необхідно переглянути реологічні рівняння кожної фази мезги, характер взаємодії, зміни співвідношень фаз мезги в одиниці обсягу в часі та в робочій порожнині апарату. Важливо враховувати вплив спільних процесів обробки парою і водою.

Перехід від моделювання окремих апаратів до моделювання складних схем пов'язаний із значним збільшенням розмірності розв'язуваних завдань, які характеризуються великою кількістю рівнянь та змінних. Тому одна з особливостей проблеми полягає в зменшенні розмірності розв'язуваної задачі, яка часто досягається зведенням завдання великої розмірності в деякій сукупності взаємопов'язаних завдань меншої розмірності.

4.1.2. Розрахунок енергії зв'язку вологи м'ятки рицини при смаженні її в багатогачанній жаровні

Однокамерні апарати киплячого і фонтануючого шару мають суттєвий недолік, що полягає в нерівномірності обробки окремих частинок матеріалу. Причиною такої нерівномірності є, як відомо, відмінність у часі перебування в киплячому шарі окремих частинок або груп частинок сипучого матеріалу [14]. Це погіршує умови обробки окремих частинок та зменшує загальну глибину сушіння.

З іншого боку, великий час перебування в апараті призводить до тривалого перегріву висушених частинок при максимальній температурі і погіршення якості матеріалів, особливо термолабільних.

Найбільш простий шлях усунення цього недоліку - секціонування апарату киплячого шару. При збільшенні числа послідовних секцій частки матеріалу більш рівномірно розподіляються за часом перебування в апараті, наближаючись до розподілу повного витіснення. Наслідком цього є більш рівномірне та глибоке сушіння матеріалу.

Тому головним завданням при моделюванні процесів смаження є визначення геометричних розмірів апарату, оптимальна кількість секцій та технологічних параметрів процесу сушіння.

Вологе жаріння ділиться на два етапи: 1) зволоження та швидке нагрівання м'ятки з доведенням до оптимальної початкової вологості при смаженні 2) висушування зволоженої м'ятки з доведенням її вологості та температури до значень, оптимальних для віджиму масла; при цьому відбувається формування внутрішньої та зовнішньої структури мезги, ослаблення зв'язку олії з матеріалом та фізичне зміна олії, зокрема зниження його в'язкості.

Результати досліджень та практичний досвід [15, 16, 17] показав, що при підвищеному зволоженні м'ятки (до 13,0–13,5 %) можна отримати олію, яка відрізняється високою якістю, містить мінімальну кількість супутніх речовин: фосфатидів, каротиноїдів, суспензій тощо. п., що пояснюється низькою температурою його отримання.

У 1930 р. Скіпін вперше запропонував і здійснив у виробничому мас-штабі спосіб вилучення олії шляхом сильного зволоження та нагрівання м'ятки у звичайному чані жаровні з отворами в днищі для спуску олії, названому форчаном.

Істотним технологічним недоліком способу знежирення методом високих зволожений було отримання після попереднього вилучення олії дуже вологого напівзнежиреного матеріалу, що містить ще до 20% олії. Для отримання цього масла пресовим способом або екстракцією необхідна була тривала теплова обробка мезги. Це не тільки істотно погіршувала якість масла, але і приводило через утворення міцних сполук типу ліпід - білок до неможливості досить ефективного остаточного віджиму масла. З'явився в 50-і роки метод отримання масла дворазовим пресуванням на шнекових пресах за схемою форпресування мезги - остаточне пресування форпресової макухи все ж забезпечував менш жорсткі теплові умови вилучення масла в порівнянні

з вилученням масла остаточним пресуванням напівобезжиреної по методу А.І. Скіпіна.

У зв'язку з тим, що при смаженні обрано оптимальну початкову вологість 13.5 %, то спочатку відбувається видалення вільної вологи. Для видалення цієї вологи потрібна енергія тільки на нагрівання та випаровування. На другому етапі сушіння м'ятки (мезги) видаляється волога, що володіє тією чи іншою формою зв'язку з матеріалом, але не вільна. Це впливає з відносно низького рівня вологості матеріалу під час смаження, коли енергія зв'язку більша за нуль. Для подолання цієї енергії зв'язку необхідно витратити певну додаткову кількість тепла, яку неможливо визначити з теплових балансів, зазвичай складаються при розрахунку жаровень.

Основними загальноприйнятими методами розрахунку багаточанних жаровень є складання матеріальних та теплових балансів усієї багаточанної жаровні, або кожного чана [18, 19, 20]. У встановленій методиці на підставі матеріального та теплового балансів визначають витрату пари. За встановленим тепловим навантаженням, вирішуючи відоме рівняння Фур'є, визначають потрібну поверхню нагріву. Незважаючи на те, що при смаженні м'ятки (мезги) видаляється волога, що володіє тією чи іншою формою зв'язку з матеріалом, в існуючих методиках складання матеріального і теплового балансу цей зв'язок не враховують.

В роботах П.А. Ребіндера [21], С.М. Ліпатова [22], М.Ф. Казанського [23], та Ю. Л. Кавказова [24] встановлено основні закономірності зв'язку поглиненої речовини з капілярно-пористими тілами, тобто. створено сучасне вчення про форми зв'язку вологи з вологими матеріалами. Процес видалення вологи з тіла супроводжується порушенням зв'язку її з тілом, потім витрачається певна енергія. Тому класифікація форм зв'язку вологи має бути побудована за принципом вивчення інтенсивності енергії зв'язку. За таким принципом побудовано схему П.А. Ребіндера [21].

Класифікація форм зв'язку вологи в колоїдних капілярно-пористих матеріалах, запропонована П.А. Ребіндером, враховує як природу утворення різних форм, так і енергію зв'язку їх з матеріалом. Відповідно до класифікації П.А. Ребіндера, широко прийнятої в сушильній техніці, всі форми зв'язку вологи діляться на три великі групи: 1) хімічний зв'язок; 2) фізико-хімічний зв'язок; фізико-механічний зв'язок.

1. Хімічно зв'язана вода виключно міцно пов'язана з матеріалом і може бути видалена з нього тільки при хімічній взаємодії або особливої інтенсивної теплової обробки (прожарюванням).

2. Фізико-хімічний зв'язок вологи в різних, не строго певних співвідношеннях.

а) Адсорбційно пов'язана волога. Така волога є рідиною, що утримується сило-
вим полем на зовнішній і внутрішній поверхні «міцел» і колоїдних частинок з соль-
ватним шаром, а іноді і з шаром іонів. Видалення міцно пов'язаної з тілом ад-
сорбційної вологи пов'язане з відповідною витратою енергії. А.В. Ликов вказує, що
для видалення адсорбційної вологи вона повинна бути перетворена на пару, після
чого починається переміщення її до зовнішньої поверхні тіла.

б) Осмотично утримана волога (волога набухання та структурна волога). До
цих видів відноситься волога, що входить у замкнених осередках, як поглинена осмо-
тично складно побудованою міцеллою (теорія С.М. Ліпатова), так і іммобілізаційна -
структурна волога (теорія П.А. Ребіндера), захоплена при формуванні гелю. Ця во-
лога є вільною тому, що їй відповідає дуже мала енергія зв'язку.

3. Фізико-механічний зв'язок - утримання води в невизначених кількостях.

а) Волога макрокапілярів.

б) Волога мікрокапілярів.

Капілярна волога є вільною вологою. Вона переміщається у тілі як вигляді
рідини (зазвичай із центральних шарів тіла до зони випаровування), і у вигляді пари
(від зони випаровування через сухий шар назовні).

Аналіз термограм нагрівання вологого матеріалу при сушінні методом М.Ф. Ка-
занський дає результати, що узгоджуються з аналізом ізотерм сорбції. Перевагою за-
значеного методу є його швидкість порівняно зі значною тривалістю зняття ізотерм
сорбції. Разом з тим цей метод дозволяє наочно уявити кінематику послідовного ви-
далення з тонкого шару матеріалу води різних форм і видів зв'язку зі скелетом мате-
ріалу.

На рис. 3.2 наведені термограма I і крива сушіння II тонкого колоїдного
капілярно-пористого матеріалу; ця крива показує зміну вологості даного матеріалу в

часі. По точках термограми та кривої сушіння М.Ф. Казанський дав схему класифікації видів зв'язку вологи з матеріалом. Для зручності поєднання графіків крива сушіння читається з права наліво, а термограма представляє зміни різниці $(t-\theta)$ в часі. Де t – температура навколишнього повітря, температура матеріалу, яка наприкінці сушіння дорівнює t .

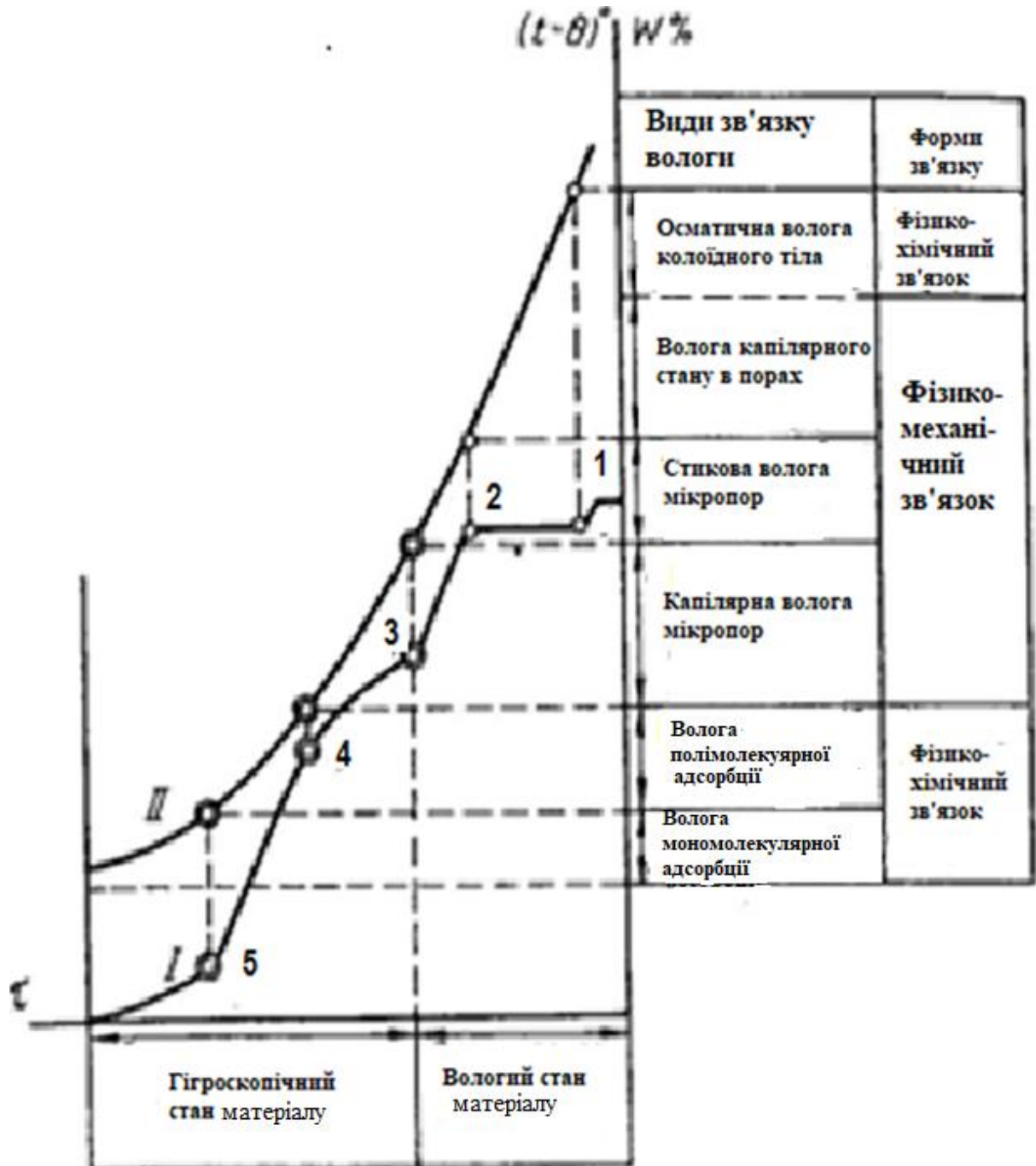


Рис. 3.2. Схема кінетики послідовного видалення вологи різних форм та видів зв'язку в процесі суші тонких зразків колоїдних капілярно-пористих тіл [25]

Найбільш характерними є дві точки термограми: точка 3, що відповідає гігроскопічному стану матеріалу, до якого належать наступні види зв'язку води: волога мікрокапілярів, волога полімолекулярної адсорбції. Поділ останніх видів зв'язку здійснюється в точці 5.

При вологому стані матеріалу в ньому міститься осмотична утримана волога колоїдного тіла і волога, що знаходиться в об'ємах, обмежених стінками пір з радіусом $r > 10^{-5}$ см, тобто. волога макрокапілярів, або стикова волога, що знаходиться в місцях стику зернистого матеріалу, де так само, як і в капілярах утворюються меніски. Насправді доводиться мати справу з товстішими зразками матеріалів. Слід гадати, що послідовність видалення вологи з окремих шарів матеріалу така ж, як із видалення з тонкого шару, але видалення вологи по шарах зміщується в часі.

Для конкретних матеріалів це припущення вимагає експериментальної перевірки, як і необхідне визначення енергії зв'язку вологи з матеріалом на різних етапах процесу сушіння.

До цього часу в масложировій промисловості розрахунок тепла на випаровування вологи відбувався без урахування енергії зв'язку вологи з матеріалом. Однак цієї складової витрати тепла нехтувати не слід особливо при процесі смаження м'ятки в багаточанних жаровнях.

Розрахунки показують [26], що при видаленні адсорбовано пов'язаної вологи витрата тепла еквівалентна роботі оборотного ізотермічного відриву вологи, що може становити приблизно до 40% витрати тепла на випаровування вільної води.

За даними Ю.Л. Кавказова [24], наприклад, на зруйнування зв'язку адсорбованої шкіри витрачається тепла до 60% від теплоти випаровування. У роботі [26] на підставі даних [27] представлені дані рівноважного питомого вмісту вологи і енергії зв'язку вологи насіння рицини з вмістом 55,1% жиру на сухе зерно.

Залежність питомого зволоження від енергії зв'язку для насіння рицини

Тем-пер.	Позн.	Відносна вологість, %							
		20	30	40	50	60	70	80	90
24	<i>u</i>	0.0287	0.035	0.0413	0.049	0.056	0.0606	0.075	0.09
	<i>E</i>	40.52	30.32	23.08	17.46	12.86	8.984	5.621	2.654

Простий розрахунок дозволив, користуючись табличними даними, визначити залежність між питомим вмістом вологи і енергією зв'язку вологи насіння рицини.

Наприклад:

$$40.52 \cdot 10^4 = 405200 \text{ кг} \cdot \text{м/моль} \cdot 9,81 = 3975012 \text{ Дж/моль} = 3975 \text{ кДж/моль}$$

Для насіння рицини

$$u = [0,0287 \ 0,035 \ 0,0413 \ 0,049 \ 0,056 \ 0,0606 \ 0,065 \ 0,07 \ 0,075 \ 0,08 \ 0,085 \ 0,09];$$

$$E = [3975 \ 2974,4 \ 2264,1 \ 1712,8 \ 1261,6 \ 881,33 \ 658,0645 \ 490,3226 \ 410,2 \ 361,2903 \ 309,6774 \ 260,36];$$

При продуктивності семичанної жаровні 315 кг/год м'ятки з вихідною вологістю 7% і початковою вологістю при смаженні 13.5% кінцевий вміст вологи вміст мезги в сьомому чані становить 0,05 кг/кг і потрібну кількість теплоти без урахування розриву енергії зв'язку 934. Енергія зв'язку вологи з м'яткою кліщовини, згідно [26] 1712,8 кДж/моль. При випаровуванні 2,6189 кг вологи, що становить $2618,9:18=145$ молей та потрібна енергія на розрив зв'язку вологи з мезгою $1712,8 \cdot 145,5=249210$ кДж. Це перевищує в 26,7 разів енергію на нагрівання та випаровування вологи без урахування розриву зв'язку вологи з матеріалом.

Таке співвідношення витрати енергії виконати в чані жаровні взагалі неможливо. Крім того, у кожному чані свої технологічні режими, у тому числі початкові та кінцеві вологовміст та температура. Тому необхідно шукати метод аналітичного визначення залежності питомого вмісту вологи і енергії зв'язку вологи з м'яткою сіян рицини.

Метою даного розрахунку є визначення технологічних режимів у кожному чані з урахуванням енергії зв'язку вологи з оброблюваної м'яткою насіння рицини.

У зв'язку з цим на першому етапі математичного моделювання процесу смаження важливо задавшись продуктивністю жаровні і внутрішнім діаметром чанів встановити взаємозв'язок їх з технологічними режимами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити методику визначення залежності енергії зв'язку вологи з оброблюваною м'яткою від питомого вмісту вологи і технологічних режимів процесу сушіння в кожному чані багаточанної жаровні;

– визначити чисельні значення енергії зв'язку вологи з м'яткою для кожного чану жаровні з урахуванням кінцевого вмісту вологи м'ятки та її температури;

- Визначити раціональні режими вологотеплової обробки м'ятки насіння рицини в кожному чані.

Пропонована методика визначення залежності енергії зв'язку вологи з м'яткою при вологотепловій обробці в багаточаковій жаровні полягає в наступному. За відомим рівнянням Фур'є визначають кількість тепла, що проходить через поверхню нагрівання чана, що розглядається. Складається матеріальний та тепловий баланс для кожного чана.

З отриманих залежностей визначаються кількість вологи, що випаровується, і витрати теплової енергії на нагрівання і випаровування вологи, без урахування енергії зв'язку вологи з матеріалом. Якщо чисельне значення теплової енергії на нагрівання і випаровування вологи дорівнює кількості тепла, що проходить через поверхню нагріву чану, що розглядається, то в даному чані при сушінні видаляється вільна волога. Якщо чисельне значення теплової енергії на нагрівання та випаровування вологи більше кількості тепла, що проходить через поверхню нагріву аналізованого чана, то помилка у складанні матеріального та теплового балансу. Необхідно збільшити кінцеву вологість в даному чані або знизити кінцеву температуру. Тоді при розрахунку може виникнути потреба збільшити в жаровні число чанів.

Так як внутрішній діаметр чанів і тиск зарубіжної пари вже вибрано. Якщо чисельне значення теплової енергії на нагрівання та випаровування вологи менше кількості тепла, що проходить через поверхню нагріву аналізованого чана, то різниця енергій визначеної за рівнянням Фур'є і з матеріального балансу складе енергію, що

витрачається на розрив зв'язку вологи з м'ятою (мезгою). Кількість випаровуваної вологи в даному чані переводять до числа молей. Енергію, що витрачається на відрив зв'язку вологи з матеріалом, ділять на число молей. Отримують енергію зв'язку вологи з матеріалом на один моль.

Нижче наведено чисельні визначення енергії зв'язку вологи з м'яткою насіння рицини для останніх п'яти чанів, де відбувається період падіння швидкості сушіння.

Таблиця 3.2

Хімічний склад 1 кг м'ятки (мезги)

Плоди рицини та їх частини	Ліпіди	Протеїн (Nx6,75)	Клітчатка	Мінеральні речовини
Насіння (м'ятка, мезга)	55,0	20,1	21,8	3,1
Вміст сухої речовини в насінні (м'ятці, меззі)	57,1	20,7	22,2	-
Насіннева оболонка	1,2 – 1,6	6,5 – 7,0	67,1 – 68,4	2,8 – 3,0
Ядро	66,0 – 68,2	25,3 – 26,9	0,6 – 0,9	2,4 – 2,7

Варіант без відділення лушпиння (22% лушпиння і 78% ядра). Теплоємність сухої жирної речовини м'ятки може бути обчислена за законом адитивності:

$$c = \frac{c_M \cdot M + c_P \cdot P + c_K \cdot K}{M + P + K} = \frac{2.095 \cdot 57.1 + 2.095 \cdot 20.7 + 1.3408 \cdot 22.2}{100} = 1.9276 \text{ кДж/кг}$$

де c_M – теплоємність олії 2,095 кДж/кг °С;

c_P – теплоємність протеїну 2,095 кДж/кг °С;

c_K – теплоємність клітковини 1,3408 кДж/кг °С;

c_B – теплоємність води 4,19 кДж/кг °С.

Кількість проходить тепла через поверхню нагріву визначаємо за відомим рівнянням Фур'є:

$$Q = Fk\Delta t_{cp}\tau \quad (3.1)$$

где Q – кількість тепла, що проходить через поверхню нагрівання, Вт;

Δt_{cp} – середня різниця температури процесу, К

τ – тривалість процесу, с.

Коефіцієнт теплопередачі від конденсуючої пари до мезги через стінку:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (3.2)$$

де α_1 – коефіцієнт теплопередачі від конденсуючої пари до стінки, Вт/(м² · К);

α_2 – коефіцієнт теплопередачі від стінки до мезги, що перемішується, Вт/(м² · К);

δ – товщина стінки, м;

λ – теплопровідність матеріалу стінки, Вт/(м · К).

У теорії сушіння вологість зазвичай розглядається по відношенню до маси сухого матеріалу, яка в процесі сушіння залишається незмінною, що представляє зручність для розрахунків.

Вологість матеріалу по відношенню до маси сухої речовини, %

$$W^c = \frac{g_{вл}}{g_{с.вещ}} \cdot 100. \quad (3.3)$$

Вологість матеріалу по відношенню до загальної маси, %

$$W = \frac{g_{вл}}{g} \cdot 100.$$

(3.5)

Формули переходу, %

$$W^c = \frac{W}{100 - W} \cdot 100.$$

(3.6)

$$W = \frac{W^c}{100 - W^c} \cdot 100.$$

Якщо вологість матеріалу по відношенню до маси сухої речовини виразити в кг/кг с. вещ, то отримаємо вміст води вміст (питомий вміст води).

$$u = \frac{g_{вл}}{g_{с.вещ}}. \quad (3.7)$$

Вологовміст може характеризувати вологість як всього об'єму матеріалу, а й вологість у шарі чи точці. Якщо волога розподілена рівномірно за перерізом матеріалу, то

$$W^c = 100u, \text{ або } u = \frac{W^c}{100}. \quad (3.8)$$

Таблиця 3.3.

Вхідні дані

№/пп	Найменування позиції	Од. вимір.	Вел.
1	Добова продуктивність лінії	кг/добу	7500
2	Годинна продуктивність лінії	кг/год	315
3	Вихідна вологість м'ятки	%	7
4	Продуктивність по сухій жирній речовині	кг/год	292,95
5	Питома теплоємність сухої жирної речовини м'ятки	кДж/(кг·К)	1,9276
6	Олійність насіння за фактичної вологості	%	55
7	Час смаження м'ятки у жаровні	хв	60
8	Продуктивність жаровні	кг/год	315
9	Кількість чанів	шт	7
10	Насипна маса м'ятки	кг/м ³	535
11	Об'єм маси м'ятки в чані	м ³	0,1460
12	Діаметр дна чана	м	2,2
13	Розрахункова площа днища чана	м ²	3,7994
14	Товщина дна чану	м	0.01
15	Теплопровідність днища чану	Вт/(м·К)	46,52
16	Тиск зарубашкового пару в чані жаровні	МПа	0,7
17	Температура зарубашкового пару	°С	164,2
18	Питома ентальпія зарубашкового пару	кДж/кг	2769
19	Тиск гострого пару	МПа	0,2
20	Температура гострого пару	°С	119,6
21	Питома ентальпія гострого пару	кДж/кг	2710
22	Питома ентальпія конденсату глухого пару	кДж/кг	694,3
23	Коефіцієнт теплопередачі від водяної пари, що конденсується, до днища, α_1	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	11630
24	Коефіцієнт теплопередачі від днища чану до м'яти, α_2	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	209,34
25	Термічний опір днища жарівні		0,000215
26	Загальний коефіцієнт теплопередачі від конденсуючого пару до м'яти	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	196,547

Задавшись діаметром чанів, розглянемо:

$d = 2,2$ м, $F = 3,7994$ м² розглянемо роботу чанів, у яких здійснюється сушіння. У другому чані здійснюється сушка вільної вологи при постійній температурі.

В інших чанах здійснюється сушіння з відривом енергії зв'язку вологи і визначенням величини цієї теплової енергії.

Розрахунок другого чану жаровні

Таблиця 3.4

Матеріальний баланс

Вхід, кг	Вихід, кг
1. М'ятка вологістю 13,5 % $\frac{292,95 \cdot 100}{100 - 13,5} = 338,6705$ кг	1. М'ятка $338,6705 - m_{\text{ви}}$
1.1 Суха олійна речовина м'ятки 292,95 кг	1.1 Суха олійна речовина м'ятки 292,95 кг
1.2 Волога м'ятки $338,6705 - 292,95 = 45,7205$ кг	1.2 Волога м'ятки $45,7205 - m_{\text{ви}}$
2. Глуха пара D	2. Конденсат глухого пару D
	3. Випарена волога $m_{\text{ви}}$
Всього: $338,6705 + D$	$338,6705 + D$

Таблиця 3.5

Тепловий баланс

Вхід	Вихід
1. Тепло, що вноситься м'яткою 58686 кДж	1. Тепло, що вноситься м'яткою $58686 - 325,144 \cdot m_{\text{ви}}$
1.1 Суха олійна речовина м'ятки $Q_1 = m_c c_c t_1 = 292,95 \cdot 1,9276 \cdot 77,6 = 43820$ кДж	1.1 Суха олійна речовина м'ятки $Q_4 = m_c c_c t_2 = 292,95 \cdot 1,9276 \cdot 77,6 = 86944$ кДж
1.2 Волога м'ятки $Q_1 = m_b c_b t_1 = 45,7205 \cdot 4,19 \cdot 77,6 = 14866$	1.2 Волога м'ятки $Q_5 = m_b c_b t_1 = m_b \cdot 4,19 \cdot 77,6 =$

	$= 325,1440 \cdot (45.7205 - m_{\text{ви}}) =$ $= 14866 - 325.1440 \cdot m_{\text{ви}}$
2. Тепло, що вноситься глухою парою $Q_3 = i_{\text{п}} D = 2769 \cdot D$	2. Тепло, що виноситься конденсатом глухого пару $Q_6 = 694.3 \cdot D$
	3. Тепло, що виноситься випарованою вологою $Q_7 = i \cdot m_{\text{ви}} = 2640.1 \cdot m_{\text{ви}}$ де $i = 2640,1$ кДж/кг – тепловміст пару при $t = 77,6^\circ \text{C}$
	4. Тепловтрати приймемо рівними 3% от Q_3 $Q_8 = 0.03 \cdot 2769D = 83,07D$
Всього: $58686 + 2769D$	$58686 + 2315 \cdot m_{\text{ви}} + 777,37D$

Прирівнюємо ліву та праву частини теплового балансу

$$58686 + 2769D = 58686 + 2315 \cdot m_{\text{ви}} + 777,37D$$

Перенесемо в один бік члени зі змістом, який описує кількість потрібної пари, а в другу баланс тепла

$$2315 \cdot m_{\text{ви}} = (2769 - 777,37)D$$

Визначаємо кількість тепла, що проходить через поверхню нагріву днища першого чану жаровні за рівнянням Фур'є

$$Q = 3,7994 \cdot 196,547 \cdot 86,6 \cdot 600 = 38802000 \text{ Дж} = 38802 \text{ кДж}$$

Замінюємо в балансовому рівнянні праву частину на кількість тепла, визначену за рівнянням Фур'є

$$2315m_{\text{ви}} = 38802$$

Визначаємо кількість вологи, що випаровується.

$$m_{\text{ви}} = \frac{38802}{2315} = 16,7611 \text{ кг}$$

Кількість м'ятки на виході з другого чану

$$338,6705 - m_{\text{ви}} = 338,6705 - 16,7611 = 321,9094 \text{ кг}$$

Кількість вологи в м'ятці на виході з другого чану

$$90,7153 - m_{\text{вн}} = 45,7205 - 16,7611 = 28,9594 \text{ кг}$$

Вологість м'ятки на виході з другого чану

$$W = \frac{28,9594}{321,9094} \cdot 100 \approx 9\%$$

$$u_2 = \frac{9}{100 - 9} \approx 0.1\%$$

Розрахунок третього чану жаровні

Таблиця 3.6

Матеріальний баланс

Вхід, кг	Вихід, кг
1. М'ятка вологістю 9 % 321,9094 кг 1.1 Суха олійна речовина м'ятки 292,95 кг 1.2 Волога м'ятки 28,9594	1. М'ятка вологістю 8.2% $\frac{292,95}{100-8,2} \cdot 100 = 319,1176 \text{ кг}$ 1.1 Суха олійна речовина м'ятки 292,95 кг 1.2 Волога м'ятки $319,1176 - 292,95 = 26,1676 \text{ кг}$
2. Глуха пара D	2. Конденсат глухого пару D
	3. Випарена волога $28,9594 - 26,1676 = 2,7918 \text{ кг}$
Всього: 321,9094+D	321,9094+D

Таблиця 3.7

Тепловий баланс

Вхід	Вихід
1. Тепло, що вноситься м'яткою 53236 кДж 1.1 Суха олійна речовина м'ятки $Q_1 = m_c c_c t_1 = 292,95 \cdot 1,9276 \cdot$ $\cdot 77,6 = 43820 \text{ кДж}$ 1.2 Волога м'ятки	1. Тепло, що виноситься м'яткою 56037,3 кДж 1.1 Суха олійна речовина м'ятки $Q_4 = m_c c_c t_2 = 292,95 \cdot 1,9276 \cdot 83,1 \cdot$ $= 46926 \text{ кДж}$ 1.2 Волога м'ятки $Q_5 = m_b c_b t_2 = 26,1676 \cdot 4,19 \cdot 83,1 =$

$Q_2 = m_B c_B t_1 = 28,9594 \cdot 4,19 \cdot 77,6 = 9416 \text{ кДж}$	$= 9111,3 \text{ кДж}$
2. Тепло, що вноситься глухою парою $Q_3 = i_{\text{п}} D = 2769 \cdot D$	2. Тепло, що виноситься конденсатом глухого пару $Q_6 = 694,3 \cdot D$
	3. Тепло, що виноситься випарованою вологою $Q_7 = i \cdot m_{\text{ви}} = 2649,8 \cdot 2,97918 = 7397,7 \text{ кДж}$ де $i=2649,8 \text{ кДж/кг}$ питомий тепловміст пару при $t = 83,1^\circ\text{C}$
	4. Тепловтрати прийmemo рівними 3% від Q_3 $Q_8 = 0,03 \cdot 2769D = 83,07D$
Всього: $53236+2769D$	$63435+777,37D$

Прирівняємо ліві та праві частини теплового балансу

$$53236+2769D = 63435+777,37 D$$

Перенесемо в один бік члени зі змістом, який описує кількість потрібної пари, а в другу баланс тепла

$$63435-53236 = (2769-777,37) D$$

$$10199 = (2769-777,37) D$$

$$u_3 = \frac{W}{100 - W} = \frac{8,2}{100 - 8,2} \approx 0,09$$

Уточнимо кількість тепла, що проходить через поверхню нагріву днища четвертого чану жаровні за рівнянням Фур'є. Визначимо середню різницю температур процесу

$$\Delta t_1 = 164,2 - 77,6 = 86,6^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = 164,2 - 83,1 = 81,1^\circ\text{C}$$

$$\text{Так как } \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{86,6}{81,1} < 2$$

то можна середню різницю температур обчислити за спрощеною формулою

$$\Delta t_{cp} = t_s - \frac{t_1 + t_2}{2} = 164,2 - \frac{77,6 + 83,1}{2} = 83,85^\circ\text{C}$$

Згідно рівнянню Фур'є

$$Q_1 = F \cdot K \Delta t_{cp} \tau = 3,7994 \cdot 196,547 \cdot 83,85 \cdot 600 = 37570000 \text{ Дж} = 37570 \text{ кДж}$$

Порівнюємо можливу кількість тепла, що проходить через поверхню нагрівання четвертого чану із потрібним теплом для виконання заданого режиму

$$37547 - 10199 = 27371 \text{ кДж}$$

Маса вологи, що випаровується, в третьому чані становить 2,7918 кг. Ця маса складе кількість речовини м'ятки $2791,8 : 18 = 155,1$ моль. Значить при питомому вмісті вологи м'ятки $w_3 = 0,09$ кг і її температурі $83,1^\circ\text{C}$ енергія зв'язку вологи з м'яткою насіння рицини складе $27371 : 155,1 \approx 176,5$ кДж/моль.

Розрахунок четвертого чану жаровні

Таблиця 3.8

Матеріальний баланс

Вхід, кг	Вихід, кг
1. М'ятка вологістю 8,2 % 319,1176 кг	1. М'ятка вологістю 7,4 % $\frac{292,95}{100 - 7,4} \cdot 100 = 316,3607$ кг
1.1 Суха олійна речовина м'ятки 292,95 кг	1.1 Суха олійна речовина м'ятки 292,95 кг
1.2 Волога м'ятки 26,1676 кг	1.2 Волога м'ятки $316,3607 - 292,95 = 23,4107$ кг
2. Глуха пара D	2. Конденсат глухого пару D
	3. Випарена волога $26,1676 - 23,4107 = 2,7569$ кг
Всього: 319,1176 + D	319,1176 + D

Таблиця 3.9

Тепловий баланс

Вхід	Вихід

<p>1. Тепло, що вноситься м'яткою 56037,3 кДж</p> <p>1.1 Суха олійна речовина м'ятки $Q_1 = m_c c_c t_2 = 292,95 \cdot 1,9276 \cdot 83,1 = 46926$ кДж</p> <p>1.2 Волога м'ятки $Q_2 = m_b c_b t_1 = 26,1676 \cdot 4,19 \cdot 83,1 = 9111,3$ кДж</p>	<p>1. Тепло, що виноситься м'яткою 58722,8 кДж</p> <p>1.1 Суха олійна речовина м'ятки $Q_1 = m_c c_c t_2 = 292,95 \cdot 1,9276 \cdot 88,6 = 50032$кДж</p> <p>1.2 Волога м'ятки $Q_5 = m_b c_b t_1 = 23,4107 \cdot 4,19 \cdot 88,6 = 8690,8$кДж</p>
<p>2. Тепло, що вноситься глухою парою $Q_3 = i_{\text{п}} D = 2769 \cdot D$</p>	<p>2. Тепло, що виноситься конденсатом глухого пару $Q_6 = 694,3 \cdot D$</p>
	<p>3. Тепло, що виноситься випарованою вологою $Q_7 = i \cdot m_{\text{ви}} = 2659,4 \cdot 2,7569 = 7331,7$кДж где $i = 2659,4$ кДж/кг питомий тепловміст пару при $t = 88,6^\circ\text{C}$</p>
	<p>4. Тепловтрати приймемо рівними 3% от Q_3 $Q_8 = 0,03 \cdot 2769D = 83,07D$</p>
<p>Итого 56037,3+2769D</p>	<p>66053,5+777,37D</p>

Прирівняємо ліві та праві частини теплового балансу

$$56037,3+2769D = 66053,5+777,37D$$

Перенесемо в один бік члени зі змістом, який описує кількість потрібної пари,

а в другу баланс тепла

$$66053,5-56037 = (2769-777,37) D$$

$$10017 = (2769-777,37) D$$

$$u_4 = \frac{W}{100-W} = \frac{7,4}{100-7,4} \approx 0,08$$

Уточнимо кількість тепла, що проходить через поверхню нагріву днища четвертого чану жаровні за рівнянням Фур'є. Визначимо середню різницю температур процесу

$$\Delta t_1 = 164,2 - 83,1 = 81,1^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = 164,2 - 88,6 = 75,6^\circ\text{C}$$

Так як $\frac{t_1}{t_2} = \frac{81,1}{75,6} < 2$, то можна середню різницю температур обчислити за спрощеною формулою

$$\Delta t_{\text{cp}} = t_s - \frac{t_1 + t_2}{2} = 164,2 - \frac{83,1 + 88,6}{2} = 78,35^\circ\text{C}$$

Згідно рівнянню Фур'є

$$Q_1 = F \cdot K \cdot \Delta t_{\text{cp}} \cdot \tau = 3,7994 \cdot 196,547 \cdot 78,5 \cdot 600 = 351720000 \text{ Дж} = 35172 \text{ кДж}$$

Порівнюємо можливу кількість тепла, що проходить через поверхню нагрівання четвертого чану із потрібним теплом для виконання заданого режиму

$$35172 - 10017 = 25155 \text{ кДж}$$

Маса вологи, що випаровується, в четвертому чані становить 2,7569 кг. Ця маса складе кількість речовини м'ятки $27569:18=153,1611$ моль. Значить при питомому вмісті вологи м'ятки $u_4=0.08$ кг/кг і її температурі $88,6^\circ\text{C}$ енергія зв'язку вологи з м'яткою насіння рицини складе $25155:153,1611 \approx 164,2$ кДж/моль.

Розрахунок п'ятого чану жаровні

Таблиця 3.10

Матеріальний баланс

Вхід, кг	Вихід, кг
1. М'ятка вологістю 7,4 % 316,3607 кг	1. М'ятка вологістю 6,6 % $\frac{292,95}{100-6,6} \cdot 100 = 313,6510$ кг
1.1 Суха олійна речовина м'ятки 292,95 кг	1.1 Суха олійна речовина м'ятки 292,95 кг
1.2 Волога м'ятки 23,4107	1.2 Волога м'ятки $313,6510 - 292,95 = 20,7010$ кг
2. Глуха пара D	2. Конденсат глухого пару D
	3. Випарена волога

	23.4107-20.7010=2.7097 кг
Всього: 316,3607+D	316,3607+D

Таблиця 3.11

Тепловий баланс

Вхід	Вихід
1. Тепло, що вноситься м'яткою 58722,8 кДж 1.1 Суха олійна речовина м'ятки $Q_1 = m_c c_c t_2 = 292,95 \cdot 1,9276 \cdot 88,6 = 50032$ кДж 1.2 Волога м'ятки 53690 кДж	1. Тепло, що виноситься м'яткою 61299 кДж 1.1 Суха олійна речовина м'ятки $Q_4 = m_c c_c t_2 = 292,95 \cdot 1,9276 \cdot 94,1 = 53137$ кДж 1.2 Волога м'ятки $Q_5 = m_b c_b t_1 = 20,7010 \cdot 4,19 \cdot 94,1 = 8162$ кДж
2. Тепло, що вноситься глухою парою $Q_3 = i_{\text{п}} D = 2769 \cdot D$	2. Тепло, що виноситься конденсатом глухого пару $Q_6 = 694,3 \cdot D$
	3. Тепло, що виноситься випарованою вологою $Q_7 = i \cdot m_{\text{ви}} = 2669,4 \cdot 2,7094 = 7232,5$ кДж де $i = 2659,4$ кДж/кг питомий тепловміст пару при $t = 94,1^\circ\text{C}$
	4. Тепловтрати прийемо рівними 3% от Q_3 $Q_8 = 0,03 \cdot 2769D = 83,07D$
Всього: 58722,8+2769D	68531,5+777,37D

Прирівняємо ліві та праві частини теплового балансу

$$58722,8+2769D = 6853,5+777,37D$$

Перенесемо в один бік члени зі змістом, який описує кількість потрібної пари, а в другу баланс тепла

$$6853,5-58722,8 = (2769-777,37) D$$

$$9812,2 = (2769-777,37) D$$

$$u_5 = \frac{W}{100 - W} = \frac{6,6}{100 - 6,6} \approx 0,07$$

Уточнимо кількість тепла, що проходить через поверхню нагріву днища четвертого чану жаровні за рівнянням Фур'є. Визначимо середню різницю температур процесу

$$\Delta t_1 = 164,2 - 88,6 = 75,6^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = 164,2 - 94,1 = 70,1^\circ\text{C}$$

Так як $\frac{t_1}{t_2} = \frac{75,6}{70,1} < 2$, то можна середню різницю температур обчислити за спрощеною формулою

$$\Delta t_{\text{cp}} = t_s - \frac{t_1 + t_2}{2} = 164,2 - \frac{88,6 + 94,1}{2} = 72,85^\circ\text{C}$$

Зідно рівнянню Фур'є

$$Q_1 = F \cdot K \cdot \Delta t_{\text{cp}} \cdot \tau = 3,7994 \cdot 196,547 \cdot 72,85 \cdot 600 = 32484000 \text{ Дж} = 32484 \text{ кДж}$$

Порівнюємо можливу кількість тепла, що проходить через поверхню нагрівання четвертого чану із потрібним теплом для виконання заданого режиму

$$32484 - 9812,2 = 22672 \text{ кДж}$$

Маса вологи, що випаровується, в третьому чані становить 2,7097 кг. Ця маса складе кількість речовини м'ятки $2709,7:18 = 150,5389$ моль. Значить при питомому вмісті вологи м'ятки $u_5=0,007$ кг и її температурі $94,1^\circ\text{C}$ енергія зв'язку вологи з м'яткою насіння рицини складе

$$2672:150,5389 \approx 150,6 \text{ кДж/моль.}$$

Розрахунок шостого чану жаровні

Таблиця 3.12

Матеріальний баланс

Вхід, кг	Вихід, кг
1. М'ятка вологістю 6,6 % 313,6510 кг	1. М'ятка вологістю 5,8 % $\frac{292,95}{100-5,8} \cdot 100 = 310,9873$ кг
1.1 Суха олійна речовина м'ятки 292,95 кг	1.1 Суха олійна речовина м'ятки 292,95 кг
1.2 Волога м'ятки	1.2 Волога м'ятки

$313,6510 - 292,95 = 20,7010$ кг	$310,9873 - 292,95 = 18,0373$ кг
2. Глуха пара D	2. Конденсат глухого пару D
	3. Випарена волога $20,7010 - 18,0373 = 2,6637$ кг
Всього: $313,6510 + D$	$313,6510 + D$

Таблиця 3.13

Тепловий баланс

Вхід	Вихід
1. Тепло, що вноситься м'яткою 61299 кДж	1. Тепло, що виноситься м'яткою 63770.4 кДж
1.1 Суха олійна речовина м'ятки $Q_4 = m_c c_c t_2 = 292,95 \cdot 1,9276 \cdot 94,1 = 53137$ кДж	1.1 Суха олійна речовина м'ятки $Q_4 = m_c c_c t_2 = 292,95 \cdot 1,9276 \cdot 99,6 = 56243$ кДж
1.2 Волога м'ятки $Q_5 = m_b c_b t_1 = 20,7010 \cdot 4,19 \cdot 94,1 = 8162$ кДж	1.2 Волога м'ятки $Q_5 = m_b c_b t_1 = 18,0373 \cdot 4,19 \cdot 99,6 = 7527,4$ кДж
2. Тепло, що вноситься глухою парою $Q_3 = i_{\text{п}} D = 2769 \cdot D$	2. Тепло, що виноситься конденсатом глухого пару $Q_6 = 694.3 \cdot D$
	3. Тепло, що виноситься випарованою вологою $Q_7 = i \cdot m_{\text{ви}} = 2678,36 \cdot 2,6637 = 7134,3$ кДж где $i = 2678,36$ кДж/кг питомий тепловміст пару при $t = 99,6^\circ\text{C}$
	4. Тепловтрати приймемо рівними 3% от Q_3 $Q_8 = 0,03 \cdot 2769D = 83,07D$
Всього: $61299 + 2769D$	$70904,7 + 777,37D$

Прирівняємо ліві та праві частини теплового балансу

$$61299 + 2769D = 70904,7 + 777,37D$$

Перенесемо в один бік члени зі змістом, який описує кількість потрібної пари, а в другу баланс тепла

$$71028-61299 = (2769-777,37) D$$

$$9605,7 = (2769-777,37)D$$

$$u_6 = \frac{W}{100-W} = \frac{5,8}{100-5,8} \approx 0,06$$

Уточнимо кількість тепла, що проходить через поверхню нагріву днища четвертого чану жаровні за рівнянням Фур'є. Визначимо середню різницю температур процесу

$$\Delta t_1 = 164,2 - 94,1 = 70,1^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = 164,2 - 99,6 = 64,6^\circ\text{C}$$

Так як $\frac{t_1}{t_2} = \frac{70,1}{64,6} < 2$, то можна середню різницю температур обчислити за спрощеною формулою

$$\Delta t_{cp} = t_s - \frac{t_1+t_2}{2} = 164,2 - \frac{94,1+99,6}{2} = 67,35^\circ\text{C}$$

Зідно рівнянню Фур'є

$$Q_1 = F \cdot K \cdot \Delta t_{cp} \cdot \tau = 3,7994 \cdot 196,547 \cdot 67,35 \cdot 600 = 30177000 \text{ Дж} = 30177 \text{ кДж}$$

Порівнюємо можливу кількість тепла, що проходить через поверхню нагрівання четвертого чану із потрібним теплом для виконання заданого режиму

$$30177-9605,7=20571 \text{ кДж}$$

Маса вологи, що випаровується, в шостому чані становить 2,6637 кг. Ця маса складе кількість речовини м'ятки $2663,7:18=148$ моль. Значить при питомому вмісті вологи м'ятки $u_6=0.006$ кг и її температурі 99,6 ° С енергія зв'язку вологи з м'яткою насіння рицини складе $20571:148 \approx 139$ кДж/моль.

Розрахунок сьомого чану жаровні

Таблиця 3.14

Матеріальний баланс

Вхід, кг	Вихід, кг
1. М'ятка вологістю 5,8 % 310.9873 кг	1. М'ятка вологістю 5,0 % $\frac{292,95}{100-5} \cdot 100 = 308.3684$ кг

1.1 Суха олійна речовина м'ятки 292,95 кг	1.1 Суха олійна речовина м'ятки 292,95 кг
1.2 Волога м'ятки 18,0373 кг	1.2 Волога м'ятки 308,3684-292,95=15,4184 кг
2. Глуха пара D	2. Конденсат глухого пару D
	3. Випарена волога 18,0373-15,4184=2,6189 кг
Всього: 310.9873+D	310,9873+D

Таблиця 3.15

Тепловий баланс

Вхід	Вихід
<p>1. Тепло, що вноситься м'яткою 63770,4 кДж</p> <p>1.1 Суха олійна речовина м'ятки $Q_1 = m_c c_c t_2 = 292.95 \cdot 1.9276 \cdot 99.6 = 56243$ кДж</p> <p>1.2 Волога м'ятки $Q_2 = m_b c_b t_1 = 18,0373 \cdot 4,19 \cdot 99,6 = 7527,4$ кДж</p>	<p>1. Тепло, що виноситься м'яткою 66075,3 кДж</p> <p>1.1 Суха олійна речовина м'ятки $Q_4 = m_c c_c t_2 = 292.95 \cdot 1.9276 \cdot 105 = 59292$ кДж</p> <p>1.2 Волога м'ятки $Q_5 = m_b c_b t_1 = 15,4184 \cdot 4,19 \cdot 105 = 6783,3$ кДж</p>
<p>2. Тепло, що вноситься глухою парою $Q_3 = i_{\text{п}} D = 2769 \cdot D$</p>	<p>2. Тепло, що виноситься конденсатом глухого пару $Q_6 = 694,3 \cdot D$</p>
	<p>3. Тепло, що виноситься випарованою вологою $Q_7 = i \cdot m_{\text{ви}} = 2678 \cdot 2,6189 = 7037$ кДж де $i = 2687$ кДж/кг кг питомий тепловміст пару при $t=105^\circ\text{C}$</p>
	<p>4. Тепловтрати приймемо рівними 3% от Q_8 $Q_8=0,03 \cdot 2769D$</p>

Всього: 63770+2769D	73112,3+777,37D
---------------------	-----------------

Прирівняємо ліві та праві частини теплового балансу

$$63770+2769D = 73112,3+777,37 D$$

Перенесемо в один бік члени зі змістом, який описує кількість потрібної пари, а в другу баланс тепла

$$73112,3-63770 = (2769-777,37) D$$

$$9342/3 = (2769-777,37) D$$

$$u_7 = \frac{W}{100-W} = \frac{5}{100-5} = 0,0526 \approx 0,05$$

Уточнимо кількість тепла, що проходить через поверхню нагріву днища четвертого чану жаровні за рівнянням Фур'є. Визначимо середню різницю температур процесу

$$\Delta t_1 = 164,2 - 99,6 = 64,5^\circ$$

$$\Delta t_2 = 164,2 - 105 = 59,2^\circ\text{C}$$

Так як $\frac{t_1}{t_2} = \frac{64,5}{59,2} < 2$, то можна середню різницю температур обчислити за спрощеною формулою

$$\Delta t_{cp} = t_s - \frac{t_1+t_2}{2} = 164,2 - \frac{99,6+105}{2} = 61,9^\circ\text{C}$$

Зідно рівнянню Фур'є

$$Q_1 = F \cdot K \cdot \Delta t_{cp} \cdot \tau = 3,7994 \cdot 196,547 \cdot 61,9 \cdot 600 = 27735000 \text{ Дж} = 27735 \text{ кДж}$$

Порівнюємо можливу кількість тепла, що проходить через поверхню нагрівання четвертого чану із потрібним теплом для виконання заданого режиму

$$27735-9342=18393 \text{ кДж}$$

Маса вологи, що випаровується, в сьмому чані становить 2.6189 кг. Ця маса складе кількість речовини м'ятки $2618,9:18=145,5$ моль. . Значить при питомому вмісті вологи м'ятки $u_7=0.007$ кг і її температурі 105 °C енергія зв'язку вологи з м'яткою насіння рицини складе $18393:14,5 \approx 126,4$ кДж/моль.

Наведені розрахунки є проміжним етапом чисельних досліджень вологотеплової обробки м'ятки насіння рицини. Розроблена методика визначення залежності

енергії зв'язку вологи з оброблюваною м'яткою від питомого вмісту вологи і технологічних режимів процесу сушіння в кожному чані багаточанної жаровні. Запропонована методика дозволила поглибити вивчення процесу смаження м'ятки в багаточанній жаровні та визначити кількість чанів у жаровні та їх раціональні технологічні режими.

Вихідними даними для розрахунку багаточанової жаровні є характеристика оброблюваного матеріалу, початкова вологість м'ятки 13,5% при якій планується початок вологотеплової обробки, кінцева вологість і температура мезги, при якій відбувається віджимання масла, продуктивність жаровні, внутрішній діаметр чана і тиск зарубашечного пару. Попередньо проводилося рівномірне розподілення зниження вологості м'ятки та підвищення її температури по чанах.

Для кожного чана, починаючи з другого, за рівнянням Фур'є визначалося кількість тепла, що проходить через поверхню нагрівання чана, що розглядається. Склалися матеріальні та теплові баланси для кожного чана. Порівнювали кількість теплової енергії на нагрівання і випаровування вологи, отриманої з балансових рівнянь з енергією потоку проходить через поверхню нагрівання чана. У другому чані м'ятка мала вільну вологу, тому вся кількість теплової енергії витрачалася на нагрівання та випаровування вільної вологи. У наступних чанах чисельне значення теплової енергії на нагрівання і випаровування вологи було менше кількості тепла, що проходить через поверхню нагрівання чана, що розглядається. Різниця енергією визначеної за рівнянням Фур'є та з матеріального балансу становила енергію, що витрачається на розрив зв'язку вологи з м'ятою (мезгою). Кількість випаровуваної вологи в даному чані переводили до молей. Енергію, що витрачається на відрив зв'язку вологи з матеріалом, ділили число молей. Отримували енергію зв'язку вологи з матеріалом на один моль.

Якщо чисельне значення теплової енергії на нагрівання і випаровування вологи виявлялося більше кількості тепла, що проходить через поверхню нагріву чану, що розглядається, то виправляли помилку в складанні матеріального і теплового балансів. Збільшували кінцеву вологість у цьому чані або знижували кінцеву температуру. Тоді при розрахунку виникала необхідність збільшити в жаровні число чанів.

Для аналізу отриманих результатів брали наступні кінцеві дані з останніх п'яти чанів: вміст м'ятки (мізги), енергію зв'язку вологи з м'яткою, температуру м'ятки. За отриманими даними були побудовані дві залежності: залежність енергії зв'язку вологи з м'яткою від її вмісту вологи (рис.3.2), залежність енергії зв'язку вологи з м'яткою від температури м'ятки в кінці процесу кожного з останніх п'яти чанів. (Рис. 3.4)

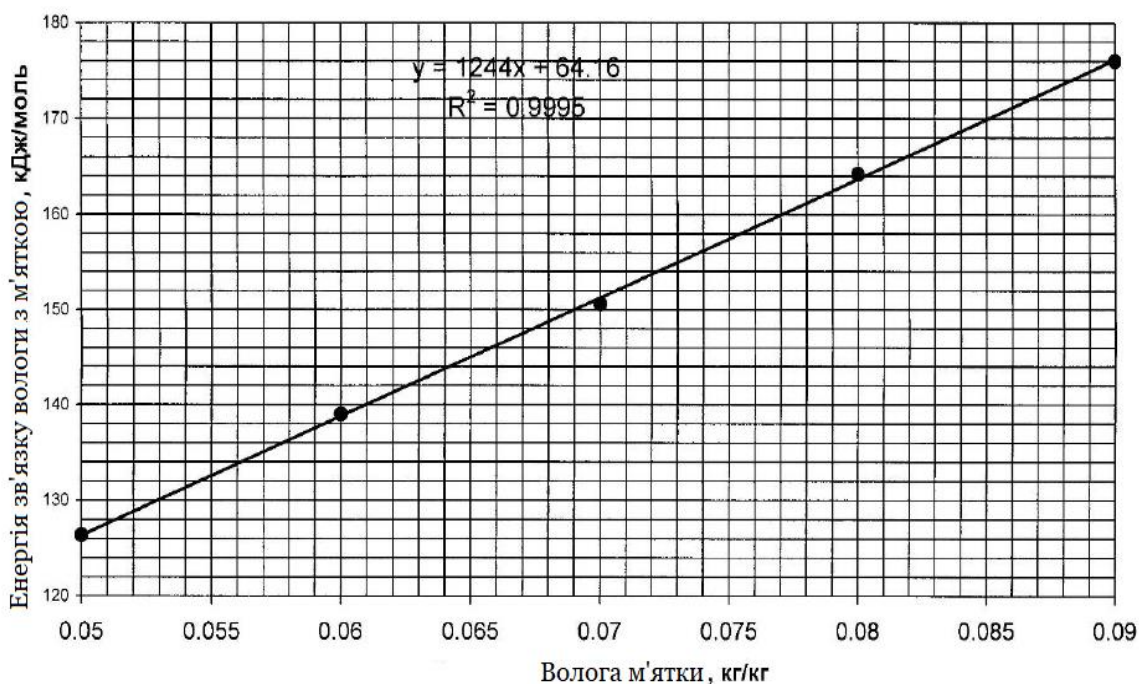


Рис. 3.3. Залежність енергії зв'язку вологи з м'яткою від її вмісту вологи

Характерно, що зі зниженням вмісту вологи м'ятки з 0,09 до 0,05 знижується енергія зв'язку вологи з м'яткою з 176,5 кДж /моль у третьому чані до 126,4 кДж /моль у сьомому чані (рис.3.3). З підвищенням температури м'ятки з 83,1о до 105 °С знижується енергія зв'язку вологи з м'яткою з 176,5 кДж /моль у третьому чані до 126,4 кДж /мол (рис.3.4). На обох графіках дано рівняння апроксимації розглянутих залежностей. Обидві залежності апроксимуються рівнянням прямою. Величини достовірності показано на графіках. Кут нахилу залежності від температури майже вдвічі вищий, ніж від вмісту вологи. Виходячи з запропонованої методики визначення енергії зв'язку, якщо чисельне значення теплової енергії на нагрівання і випаровування вологи менше кількості тепла, що проходить через поверхню нагріву аналізованого чана, то різниця енергією визначеної за рівнянням Фур'є і з матеріального балансу

складе енергію, що витрачається на розрив зв'язку вологи. Кількість випаровуваної вологи в даному чані переводять до числа молей.

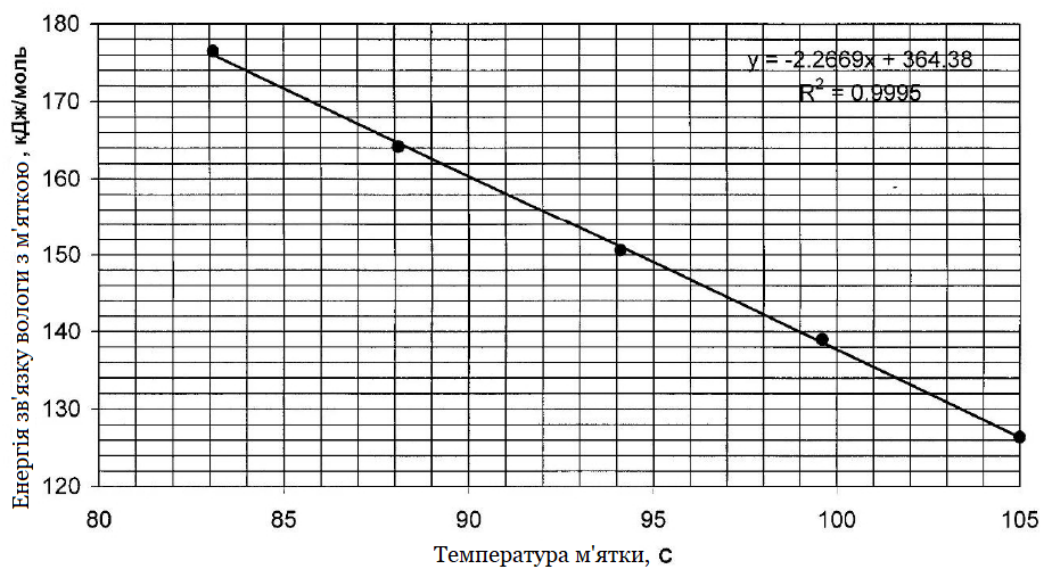


Рис. 3.4. Залежність енергії зв'язку вологи з м'яткою від її температури

Характерно, що з підвищенням робочої температури м'ятки знижується енергія зв'язку вологи з 176,5 кДж /моль у третьому чані до 126,4 кДж /моль у сьомому чані, хоча питомий вологовміст м'ятки знижується з 0,09 кг/кг в третьому чані. На наш погляд, це пов'язано з підвищенням робочої температури на виході в третьому чані з 83,1 °С до 105 °С у сьомому чані.

Застосування семичанної жаровні з внутрішнім діаметром 2,2 м і площею обігріву 3,7994 м² дозволяє забезпечити продуктивність жаровні 315 кг/год і вибрати раціональні режими вологотеплової обробки в кожному чані з поступовим зростанням робочої температури до 105 °С і зниженням питомої ваги 0,05 кг/кг.

3.1.3. Моделювання гідродинаміки мезги в багаточанній жаровні при волого-тепловій підготовці вилучення олії

Рух мезги по лопатям мішалки. У багаточанній жаровні проводиться складний технологічний процес, мета якого викликати певні фізико-хімічні зміни м'ятки і змінити структуру її частин, які сприяють найкращому ефекту при віджиманні олії. При

висушуванні на гарячій поверхні днища чана утворюється рухливий контактний шар. Поле температур будь-якого шару м'ятки в напрямку від контактного шару безперервно зменшується. Розподіл вмісту вологи в процесі сушіння нерівномірний і несиметричний: в контактному шарі, прилеглому до гарячої поверхні мінімальний, і збільшується в напрямку від гарячої поверхні. Перепад вологовмісту всередині контактного шару створюється за рахунок пароутворення, яке відбувається з різною інтенсивністю в залежності від координати шару. Через велику загальну товщину оброблюваного шару м'ятки процес тепло- і масообміну відбувається наступним чином. Волога, що випарувалася за рахунок нагріву м'ятки контактним способом, віддає своє тепло вищезташованим і більш холодним шарам м'ятки, частково конденсуючись на них; це є одним з важливих моментів механізму висушування в багаточанних жаровнях (самопропарювання).

При заключних етапах процесу жаріння в м'ятці (мезгі) видаляється волога, що володіє тією або іншою формою зв'язку з матеріалом, але не вільна. Тому при розрахунку процесу жаріння вологих матеріалів необхідно враховувати енергію для подолання розриву зв'язаної вологи з м'яткою.

Кожен чан жаровні має вигляд турбінної мішалки з похилими плоскими лопатками. Турбінна мішалка з прямими лопатками створює потік рідини, що має радіальну і тангенціальну складові. На стінці апарату цей потік гальмується, змінює свій напрямок на осьовий, піднімається вгору аж до вільної поверхні і звідси знову повертає в напрямку мішалки [2]. Для опису процесів, що відбуваються на днищі в чані жаровні необхідно знати траєкторію і швидкість переміщення мезги. Таким чином, проблемою для створення математичної моделі кондуктивного і конвективного тепло- і масопереносу в багаточанній жаровні є, перш за все, детальне вивчення і математичний опис реальних процесів, що дозволяють отримати характеристики, що оцінюють рух матеріалу і тепло- вологоносія, які знаходяться в різних кількісних співвідношеннях.

Моделювання кондуктивного і конвективного тепло- і масопереносу в багаточанній жаровні присвячені роботи [4, 11, 35, 37].

В роботі [6] отримано математичну модель волого-теплової обробки в багаточанній паровій жаровні з використанням безрозмірної системи рівнянь тепло- і масопереносу, розробленої на підставі термодинаміки незворотних процесів А.В. Ликовим. Застосована теорія тепло- і масопереносу на базі розв'язання системи нелінійних диференціальних рівнянь при граничних умовах, відповідно постійним і змінним потенціалом і середовищі, змінні по наперед заданим законам. Однак ця система з її граничними умовами призначена для матеріалу і середовища, що знаходяться в нерухомому стані.

Для числових досліджень розроблена дискретна модель процесу вологотеплової обробки в товстому шарі, що складається з елементарних шарів, в кожному з яких коефіцієнти волого теплопереносу приймалися постійними, але змінювалися при переході з шару в шар.

Інтенсивний потік пару, утворений в контактному шарі, віддає своє тепло вищезрозташованим, більш холодним шарам м'ятки, частково конденсуючись на них. Використаний спосіб, побудови граничних умов, що дозволяють отримати характеристики, що оцінюють рух матеріалу і теплоносія, які знаходяться в різних кількісних співвідношеннях.

В роботі [11] розглянуто складний рух м'ятки в чані жаровні, що представляє собою турбінну мішалку з похилими лопатками. Завдяки розташуванню мішалки поряд з основним рухом утворюється потік вторинної циркуляції. Обидва типи руху показані схематично на рис. 3.5, рис. 3.6 і рис. 3.7. Тут же наведена схема розкладання сумарної швидкості мезги в чані жаровні з мішалкою на її складові. Дано аналітичні залежності складових швидкостей від результуючої невідомої швидкості.

Гідродинамічні параметри, такі як розподіл швидкості рідини в апараті, насосний ефект мішалки, час циркуляції і час перемішування системи, можуть служити основою для оцінки роботи різних типів апаратів з мішалками.

Наявність турбінної мішалки в жаровні принципово змінює фізику процесу тепло-вологотеплопереносу. З метою визначення параметрів цього процесу важливо знати швидкість переміщення мезги по гарячій поверхні чанів в т.ч. по лопастям турбіни мішалок.

При аналізі роботи [198] багаточанних жаровень, показано складний рух частинок м'ятки в жаровні при поточному-безперервному русі (рис.3.5).

Головний напрям руху матеріалу

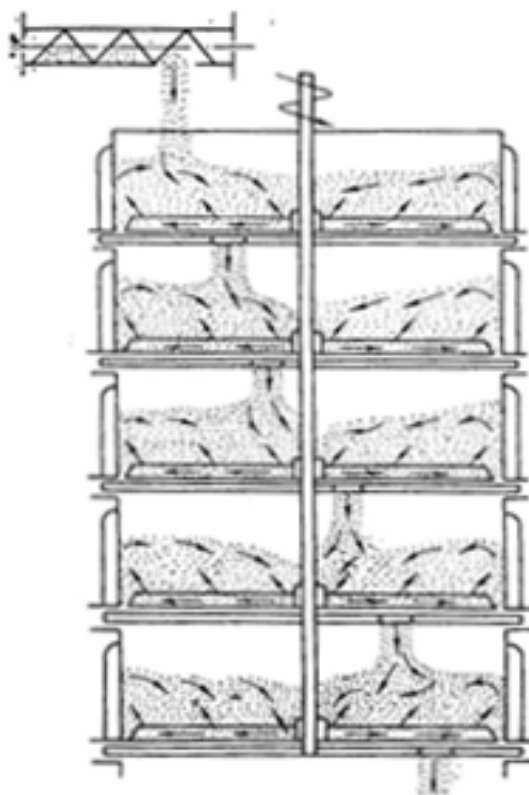


Рис. 3.5. Схема руху частинок м'ятки в жаровні при потоковому, безперервному жарінні

Рух частинки по горизонталі, що обертається навколо вертикальної осі диску з прямими, вертикально укріпленими до нього лопатками розглянуто в роботі [125]. При написанні диференційного рівняння руху цієї частки враховувалися дію наступних сил (рис. 3.6).

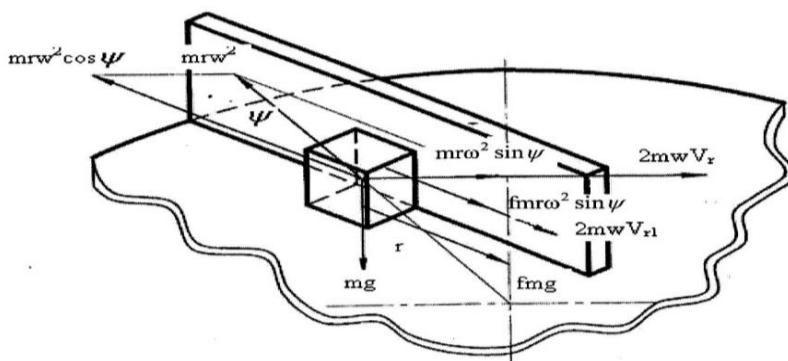


Рис. 3.6. Схема прикладання сил на частку м'ятки при русі по горизонтальному диску з прямими лопатками [6]

1) сили ваги $-mg$. При горизонтальному положенні диска і вертикальному положенні лопатки проекція цієї сили в площині диска і лопатки дорівнюють нулю;

2) відцентрової сили $-mr\omega^2$;

3) сили тертя частинки по поверхні диска $-fmg$. Так як частинка переміщається в відносному русі в площині лопатки, то ця сила теж буде направлена в площині, паралельній площині лопатки;

4) сили Коріоліса. Величина цієї сили дорівнює $2m\omega\xi'$, де ξ' – швидкість відносного руху матеріальної точки. Напрямок цієї сили перпендикулярно до напрямку відносної швидкості ξ' і орієнтований в сторону, зворотний напрямку обертання;

5) сили тертя частинок по поверхні лопатки $-2f\omega\xi'$. Поява цієї сили пов'язана з наявністю тиску частинки на поверхню лопатки, що виникає внаслідок наявності сили Коріоліса.

Так як лопатка розташована під деяким кутом радіальному напрямку, то відцентрову силу $mr\omega^2$ можна розкласти на дві складові: на складову $-mr\omega^2 \cos\psi$ в напрямку площини лопатки і на складову $-mr\omega^2 \sin\psi$, перпендикулярну до площини лопатки. Остання створює додаткову силу тертя в площині торкання частинки з поверхнею лопатки (ψ – кут, укладений між радіальним напрямком і напрямком лопатки).

Обидві сили тертя будуть спрямовані назад напрямку відносної швидкості ξ' .

Диференціальне рівняння руху частинки в напрямку лопатки матиме вигляд:

$$m\xi'' = mr\omega^2 \cos\psi - fmg + fmr\omega^2 \sin\psi - 2f\omega\xi'. \quad (3.9)$$

Для простоти викладу приймається коефіцієнт тертя частинки до поверхні диска і на поверхні лопатки однаковим. З рисунку видно, що для даної лопатки має місце наступна умова

$$r \sin \psi = r_0 \sin \psi_0 = \text{const}, \quad (3.10)$$

де r_0 – відстань від початкового положення частки до центру диска;

ψ_0 – початкове значення кута ψ .

$$r \cos \psi = \xi + r_0 \cos \psi_0. \quad (3.11)$$

Підставивши значення (3.10) і (3.11) в рівняння (3.9), отримаємо на випадок, коли лопатка буде нахилена назад

$$\xi'' + 2f\omega\xi' - \omega^2\xi = r_0\omega^2 \frac{\cos(\psi_0 - \varphi)}{\cos \varphi} - fg, \quad (3.12)$$

де φ – кут тертя.

Рівняння (3.12) є неоднорідним лінійним рівнянням другого порядку. Структура загального рішення такого рівняння визначається наступною теоремою:

Загальне рішення неоднорідного рівняння представляється як сума будь-якого приватного вирішення цього рівняння ξ^* і спільного рішення $\bar{\xi}$ відповідного однорідного рівняння

$$\xi = \bar{\xi} + \xi^*, \quad (3.13)$$

Відповідне однорідне рівняння неоднорідного рівняння другого порядку (3.12) має наступний вигляд

$$\xi'' + 2f\omega\xi' - \omega^2\xi = 0, \quad (3.14)$$

Будемо шукати спільне рішення $\bar{\xi}$ однорідного рівняння (3.14) з постійними коефіцієнтами. Приватні рішення шукаємо у вигляді

$$\xi = e^{\lambda t}, \text{ где } \lambda = \text{const}, \quad (3.15)$$

тоді

$$\xi' = \lambda e^{\lambda t}, \quad \xi'' = \lambda^2 e^{\lambda t}, \quad (3.16)$$

Підставляючи отримані вирази похідних в рівняння (3.14), знаходимо

$$e^{\lambda t} (\lambda^2 + 2f\omega\lambda - \omega^2) = 0, \quad (3.17)$$

Так як $e^{\lambda t} \neq 0$, таким чином,

$$\lambda^2 + 2f\omega\lambda - \omega^2 = 0, \quad (3.18)$$

Таким чином, якщо λ буде задовольняти рівняння (3.18), то $e^{\lambda t}$ буде рішенням рівняння (3.14). Рівняння (3.18) називається характеристичним рівнянням по відношенню до рівняння (3.14).

Характеристичне рівняння є квадратне рівняння, що має два кореня; позначимо їх через λ_1 и λ_2 . При цьому

$$\lambda_1 = \frac{-2f\omega + \sqrt{4f^2\omega^2 + 4\omega^2}}{2} = \omega(\sqrt{f^2 + 1} - f), \quad (3.19)$$

$$\lambda_2 = \frac{-2f\omega - \sqrt{4f^2\omega^2 + 4\omega^2}}{2} = \omega(-\sqrt{f^2 + 1} - f). \quad (3.20)$$

Загальний інтеграл однорідного рівняння (3.16) має вигляд

$$\bar{\xi} = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}. \quad (3.21)$$

Тому рішення неоднорідного рівняння (3.12) буде мати вигляд

$$\xi = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + r_0 \frac{\cos(\psi_0 \pm \varphi)}{\cos \varphi} - \frac{fg}{\omega^2}, \quad (3.22)$$

де C_1 та C_2 – довільні постійні.

Останні визначаємо за початковими умовами руху

При $t = 0$; $\xi = \xi' = 0$.

Визначивши постійні і підставивши їх у рівняння (3.22), отримаємо:

$$\xi = \left[\frac{fg}{\omega^2} - r_0 \frac{\cos(\psi_0 \pm \varphi)}{\cos \varphi} \right] \left[\frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_2 e^{\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{\lambda_2 t}) - 1 \right], \quad (3.23)$$

Швидкість руху частинки в напрямку лопатки визначається з рівняння:

$$\xi' = v_\xi = \left(\frac{fg}{\omega^2} - r_0 \frac{\cos(\psi_0 \pm \varphi)}{\cos \varphi} \right) \left[\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) \right], \quad (3.24)$$

Так як переносна швидкість в даному випадку представлена окружною швидкістю $v_e = r\omega$, то проектуючи відносну швидкість V_ξ на дотичну до окружної периферії диска, знайдемо швидкість розсівання частинок в цьому напрямку як алгебраїчну суму цих швидкостей:

$$v = v_e \pm v_\xi \sin \psi_1 = r\omega \pm \left(\frac{fg}{\omega^2} - r_0 \frac{\cos(\psi_0 \pm \varphi)}{\cos \varphi} \right) \left[\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) \right] \sin \psi_1, \quad (3.25)$$

де ψ_1 - кінцеве значення кута ψ .

Зауважимо, що якщо лопатки закріплені радіально, то $\psi = 0$; $r_0 = 0$, і рівняння (3.25) приймає вигляд

$$\xi = r = \frac{fg}{\omega^2} \left[\frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_2 e^{\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{\lambda_2 t}) - 1 \right], \quad (3.26)$$

У цьому випадку швидкість сходу в напрямку по дотичній буде дорівнювати переносній швидкості в кінці лопатки, тобто

$$v = v_e = r\omega, \quad (3.27)$$

Що ж стосується величини швидкості абсолютного сходу, то в цьому випадку вона визначиться з рівняння $v_a = \sqrt{v^2 + v_\xi^2}$.

Наведені розрахунки виконані для чана багаточанної жаровні з внутрішнім радіусом чане 0,5 м. Для числового дослідження кінематичного рівняння шляху від часу була складена файл функція put 1 (а) з одним параметрам процесу а, де а - кутова швидкість обертання мішалки чане жаровні.

На розгляд приймемо наступні варіанти частоти обертання лопатки-мішалки:

Таблиця 3.16

Варіанти частот обертання ножа мішалки семичанної жаровні

Вар	1	2	3	4	5	6	7	8
n	21	28	35	40	50	60	70	100
ω	2,1991	2,9307	3,6652	4,1880	5,2360	6,2832	7,3304	10,4720

Використовуючи файл функції put1 (а) були складені три графіка руху точки м'ятки по лопаті мішалки. Представлена залежність пройденої відстані від часу при збільшенні частоти мішалки від 21 до 100 об./хв.. (кутової швидкості від 2,1991 до 10,4720 рад./с) протягом 1 с.

На графіку видно, що всі криві змальовують прискорений рух. Крім того, крива шляху при частоті 100 об./хв.. різко виділяється в порівнянні з кривою при 70 об./хв.

і протягом 1 с. досягає 1 м. При радіусі лопаті мішалки 0,5 м таке інтенсивне переміщення недоцільно. Частинки м'ятки не встигатимуть нагріватися.

При більш ретельному вивченні кінематики переміщення частинок м'ятки по лопатці мішалки на рис. 3.7. розглянуто рух частинок м'ятки при частоті обертання лопатей від 21 до 70 об./хв. протягом 1 секунди.

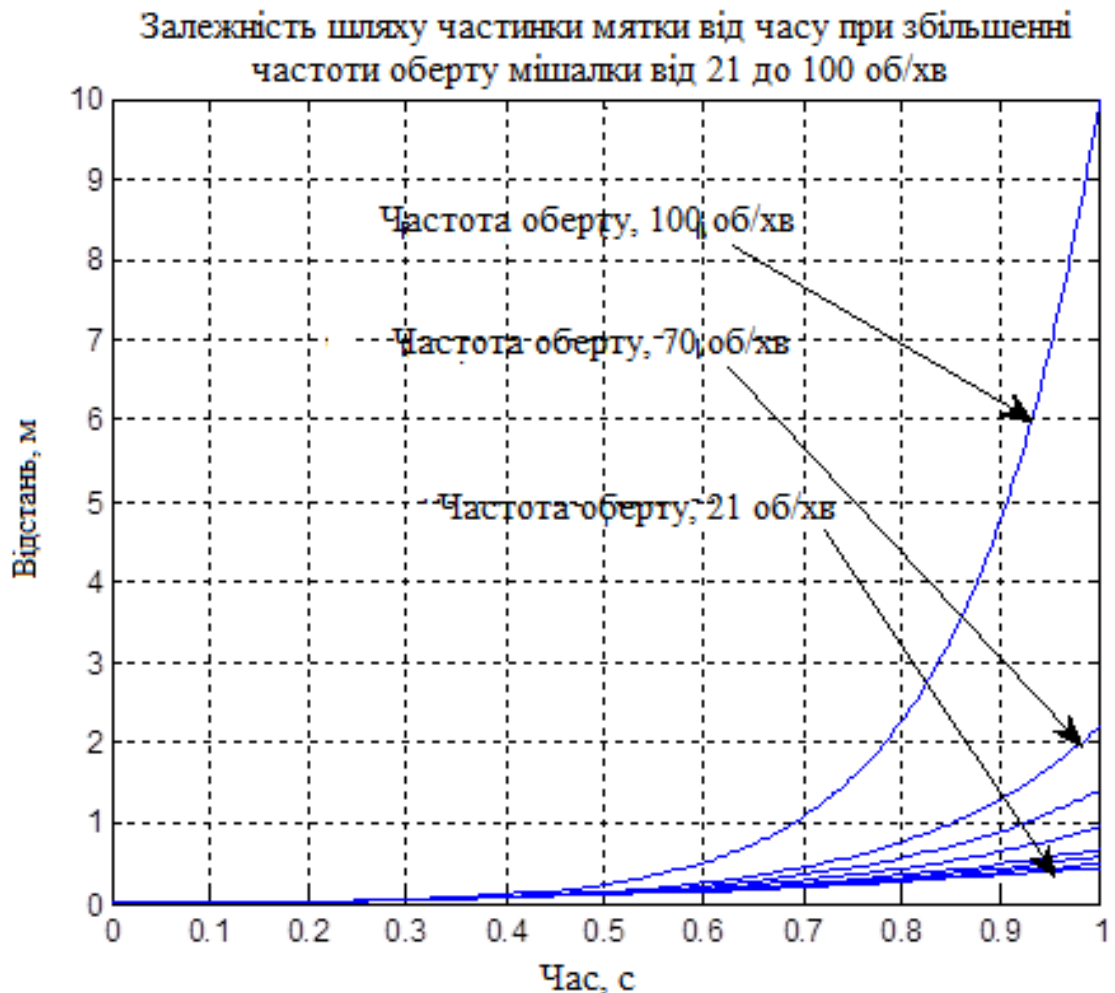


Рис. 3.7. Графік руху точки м'ятки по лопатці мішалки

При частоті обертання мішалки 21 об/хв. частки м'ятки не встигають покинути направляючу лопать мішалки 0,5 м, а при частоті обертання 70 об/хв можуть досягти радіусу понад 2 м. Приймаємо за доцільне подальше вивчення руху частинок м'ятки в діапазоні частоти обертання від 28 до 70 об./хв. в радіусі 0,5 м (рис. 3.8.)

Використовуючи наведені криві пройденого шляху від частоти обертання (рис. 3.8), графічним методом визначено час досягнення частки мяткі кінця лопаті радіусом 0,5 м. Для числового дослідження швидкості частки м'ятки від часу була складена

файл функції skor2 (a) з одним параметром процесу, а - кутова швидкість обертання мішалки чана жаровні.

Таблиця 3.17

Тривалість руху частинок м'ятки по лопатці мішалки радіусом 0,5 м в залежності від кутової швидкості мішалки

Кутова швидкість обертання, об./хв.	28	35	40	50	60	70
Тривалість руху, с	1	0.9437	0.9000	0.8281	0.7781	0.7188

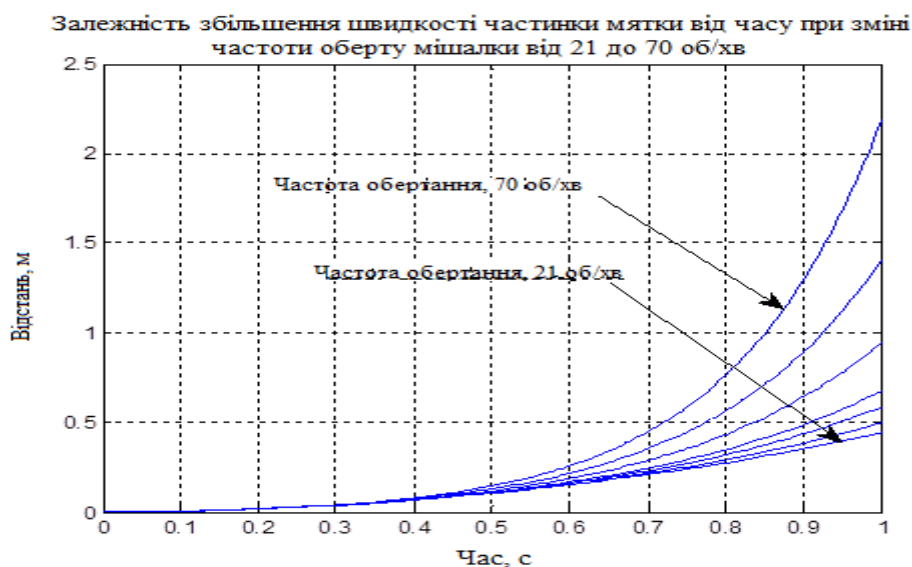


Рис. 3.8. Графік руху точки м'ятки по лопатці мішалки

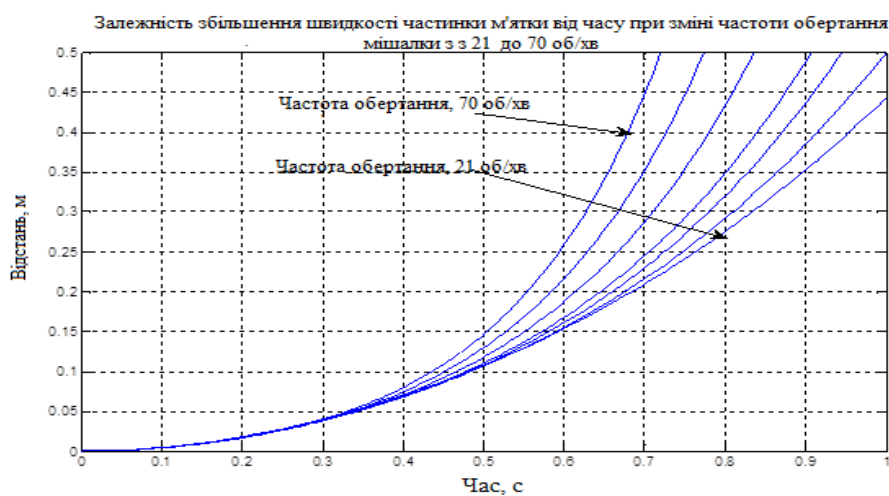


Рис. 3.9. Графік руху точки м'ятки по лопатці мішалки

Використовуючи файл функції skor2 (a) був складений графік залежності швидкості точки м'ятки по ножу лопатки від частоти мішалки. На рис. 3.10. представлена залежність швидкості точки м'ятки по ножу мішалки від часу при збільшенні частоти мішалки від 21 до 70 об/хв (кутової швидкості від 2,1991 до 7,33304 рад/с) протягом 1 с. На графіку видно, що всі криві відображають прискорений рух. Протягом перших 0,3 с всі криві незалежно від частоти обертання зливаються і близькі прямій. У цей період сили опору близькі відцентрової сили, що діє на частинки м'ятки. І далі зі зростанням відцентрової сили криві відстані розходяться, особливо після частоти 40 об/хв.

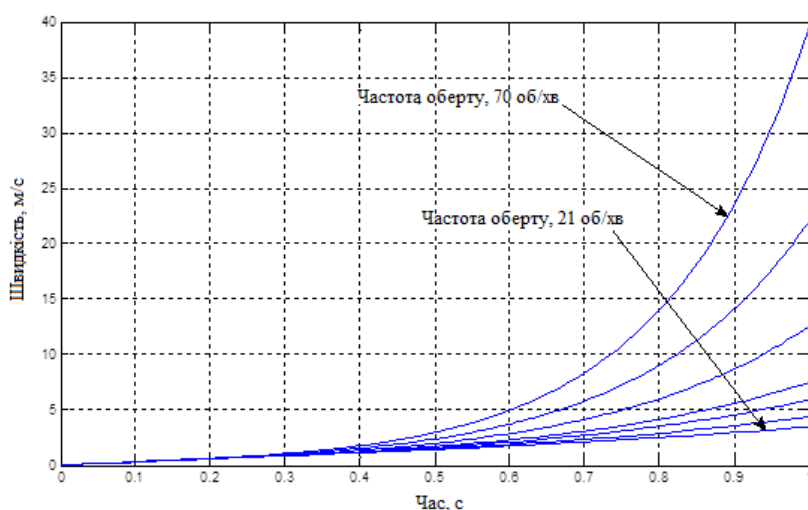


Рис. 3.10. Залежність швидкості частинки м'ятки від часу при зміні частоту обертання мішалки від 21 до 70 об./хв.

Таблиця 3.18

Швидкості сходу частинок м'ятки з кінця лопаті мішалки від часу руху при різних частоті обертання мішалки

Кутова швидкість обертання, об./хв	28	35	40	50	60	70
Кутова швидкість обертання, рад./с	2.9307	3.6652	4.1880	5.2360	6.2832	7.3304
Тривалість руху, с	1.0000	0.9437	0.9000	0.8281	0.7781	0.7188
Швидкість сходу частинок м'ятки з кінця лопатки, м/с	4.5161	5.1613	5.6452	6.6129	8.0645	9.3548

Використовуючи наведені криві швидкості частинок м'ятки від частоти обертання і знайдений тривалість руху частинок по лопатці, графічним методом визначена швидкість сходу частинок з лопатки радіусом 0,5 м залежно від кутової швидкості мішалки.

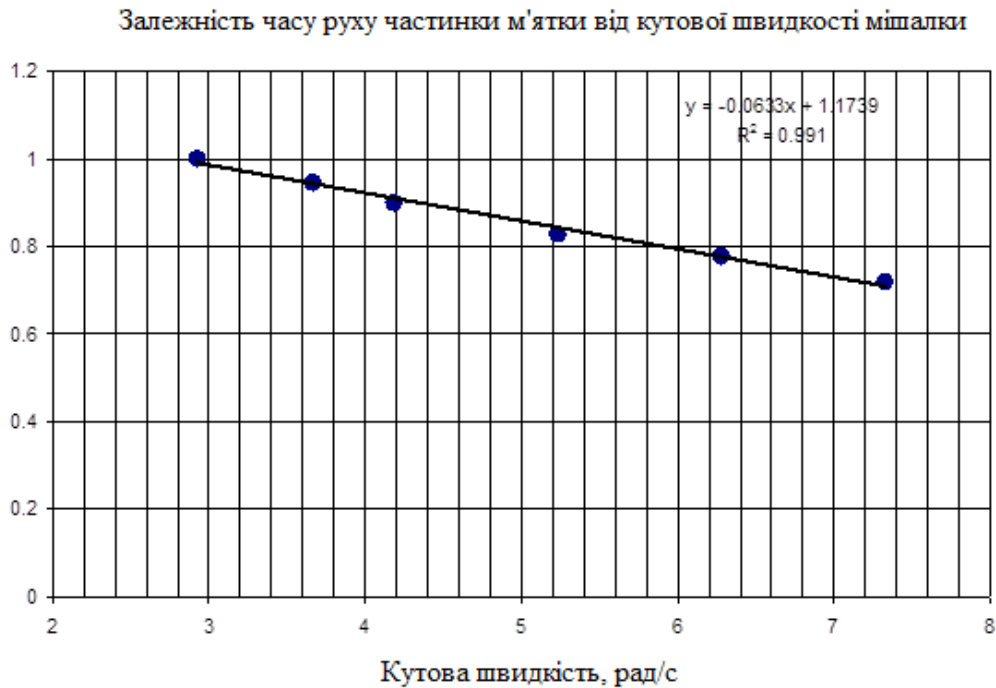


Рис. 3.11. Залежність часу руху частки м'ятки по лопатці довжиною 0,5 м від кутової швидкості мішалки чана жаровні

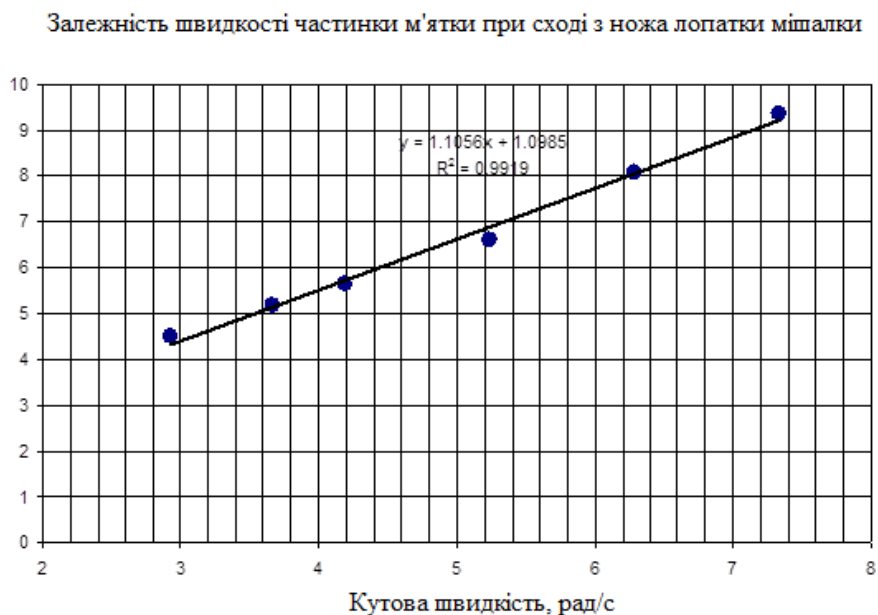


Рис. 3.12. Залежність швидкості частки м'ятки при сходженні з лопатки завдовжки 0,5 м від кутової швидкості мішалки чана жаровні

Для більш детального вивчення часу руху частинок м'ятки по лопатці мішалки і лінійної швидкості частинок на сході з лопатки, необхідних при вивченні кінематики і теплообміну в об'ємі чанів багаточанної жаровні були побудовані відповідні графіки і визначені експериментальні залежності (рис. 3.11) і (рис. 3.12).

На рис. 3.12 побудована залежність часу руху частки м'ятки по лопатці довжиною 0,5 м від кутової швидкості мішалки чана жаровні. Визначено рівняння регресії першого ступеня цієї залежності для діапазону кутової швидкості від 2 до 8 рад./с:

$$y = -0.0633x + 1.1738 \quad (3.28)$$

Достовірність апроксимації інтерполяційного полінома визначена коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0.991$.

На рис.3.12 побудована за даними таблиці 3.18 залежність лінійної швидкості мезги при сходженні з лопатки довжиною 0,5 м від кутової швидкості мішалки. Визначено рівняння регресії другого ступеня цієї залежності для діапазону кутової швидкості від 2 до 8 рад./с:

$$y = 1.1056x + 1.0985 \quad (3.29)$$

Достовірність апроксимації інтерполяційного полінома визначена коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0.9919$.

Що ж стосується величини швидкості абсолютного розсівання, то в цьому випадку вона визначиться з рівняння:

$$v_a = \sqrt{v^2 + v_{\xi}^2} \quad (3.30)$$

Для визначення абсолютної швидкості сходу частинок м'ятки з кінця лопатки чана радіусом 0,5 м проведені поетапні числові визначення значень.

3.1.4. Математична модель динаміки тепломасопереносу і фазових перетворень при сушінні м'ятки

Математичне моделювання динаміки сушіння і пропарювання в дисперсному пористому шарі м'ятки пов'язано з рішенням сполученої задачі тепломасопереносу і фазових перетворень в гетерогенних системах.

Серед математичних моделей, що застосовуються для описання динаміки сушіння капілярно-пористих матеріалів, найбільш відомою є модель А.В. Ликова [11]. Вона базується на загальних закономірностях термодинаміки необоротних процесів та містить в якості основних двох диференціальних рівнянь – теплопереносу та масопереносу рідкої фази для випадку реалізації дифузійного механізму вологопереносу [6]. У випадку високоінтенсивного проходження процесу сушіння, всередині капілярно-пористого тіла виникає градієнт загального тиску, що викликає молярний перенос парогазової суміші (пари і повітря) по типу фільтрації через пористі середовища, та система доповнюється диференціальним рівнянням фільтрації [6]. А.В. Ликов застосував до перенесення речовини методи і систему понять, які застосовуються в явищах переносу теплоти, і тим самим заклав основи загальної термодинаміки переносу, яка розглядає ці явища в їх нерозривному зв'язку, тобто так як вони протікають в дійсності.

Однак вагомим недоліком при використанні цих моделей є те, що вони містять ряд специфічних коефіцієнтів – термоградієнтний, бароградієнтний, вологопровідності, ізотермічної масоємності, критерію фазового перетворення, дані про які отримані для досить обмеженого класу пористих матеріалів, а їх самостійне визначення представляє достатньо складну задачу. Так критерій фазового перетворення ε_{ϕ} ($0 < \varepsilon_{\phi} < 1$) [6], який враховує інтенсивність випаровування рідини в порах тіла, представляється відношенням зміни вологовмісту матеріалу внаслідок фазового перетворення рідини в пару до загальної зміни його вологовмісту в результаті процесів переносу вологи і фазового перетворення. Однак, у фізичному плані процеси вологопереносу і випаровування рідини можуть протікати незалежно один від одного, і такий прийом представляє заміну однієї невідомої функції на іншу.

В математичних моделях сушіння пористих матеріалів С. Вітаккера, М.М. Гринчика, П.С. Куца, П.В. Акуліча [6] способи знаходження функції інтенсивності фазового переходу є також доволі наближеними.

В роботі [6] викладена молекулярно-радіаційна теорія тепломасопереносу, що обґрунтована на основі закону інтенсивності спектрального випромінювання мікрочастинок М.І. Нікітенко, і на відміну від феноменологічної теорії дозволяє визначати динамічні і кінетичні характеристики речовини. Згідно цієї теорії, перенос енергії, як і маси речовини або поля здійснюється матеріальними носіями, що безперервно випускаються або поглинаються частинками речовини. Тобто процеси дифузії та випаровування рідини є активаційними і їх інтенсивність істотно залежить від температури.

В рамках молекулярно-радіаційної теорії тепломасопереносу ним отримано формули:

– для розрахунку коефіцієнта дифузії рідкої фази [6], яка у граничних випадках переходить в емпіричну формулу Арреніуса для твердих тіл і у формулу Ейнштейна для рідких середовищ:

$$D_{ж} = \gamma_D \left[\exp\left(\frac{A_D}{R_y T}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (3.31)$$

де $\gamma_D = \text{const}$;

T – температура;

R_y – універсальна газова стала;

A_D – енергія активації молекул, що здійснюють дифузійний перенос;

– для інтенсивності випаровування рідини [141], яка представляє результуючий потік молекул рідини що випаровуються (перший член в дужках правої частини) і молекул пари що конденсуються на поверхні фазового переходу (другий член правої частини)

$$I = \gamma_c \left\{ \varphi_m \left(\exp\left[A/(RT)|_{v=0}\right] - 1 \right)^{-1} - \varphi_c \left(\exp\left[A/(RT_c)\right] - 1 \right)^{-1} \right\}, \quad (3.32)$$

де γ_c – коефіцієнт поверхневого випаровування, $\gamma_c = \varepsilon \rho_p \delta^* / 4$;

ε – коефіцієнт випромінювання;

φ_T – вологість парогазової суміші, якій згідно з ізотермою сорбції відповідає об'ємна концентрація U_h в даній точці пористого тіла;

ν – нормаль до граничної поверхні;

T_c і φ_c – температура і відносна вологість зовнішнього середовища.

Якщо перший член в дужках правої частини перевищує другий – формула (3.32) виражає інтенсивність випаровування. В зворотньому випадку – інтенсивність конденсації.

Молекулярно-радіаційна теорія дала подальший розвиток теорії сушіння, що дозволила вирішити ряд практичних задач [6].

У відповідності до фізичної постановки задачі зневоднення попередньо зволоженої м'ятки, математична модель динаміки тепломасопереносу і фазових перетворень в загальному випадку включає чотири диференціальні рівняння переносу: енергії, маси рідкої, парової і повітряної фаз [6, 11].

Диференційні рівняння переносу теплоти і маси будуються на основі отриманого у [6, 78] диференційного рівняння нестационарного переносу субстанції W (маси, енергії, імпульсу) для тіл, що деформуються:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\operatorname{div} J_W + I_W - \frac{W}{1 + \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t}. \quad (3.33)$$

Тут J_W – густина потоку субстанції W ;

I_W – потужність внутрішніх джерел субстанції;

ε_V – відносна об'ємна деформація тіла в результаті переносу субстанції W .

Для матеріалів, зневоднення яких не супроводжується зменшенням їх обсягу, величина $\varepsilon_V = 0$. В цьому випадку (3.31) переходить у відоме рівняння.

Густина потоку субстанції враховує дифузійний J_W^d і фільтраційний J_W^f механізми переносу: $J_W = J_W^d + J_W^f$.

Дифузійний (молекулярний) потік субстанції визначається градієнтом її потенціалу переносу. Потенціалами переносу маси компоненту ψ зв'язаної речовини (рідини $\psi = ж$, пари $\psi = п$, повітря $\psi = в$) є об'ємна концентрація U_ψ цього компоненту та температура тіла T : $J_\psi^d = -D_\psi (\nabla U_\psi + \delta_\psi^T \nabla T)$, де D_ψ – коефіцієнт дифузії компонента ψ , δ_ψ^T – відносний коефіцієнт термодифузії компонента ψ . Молекулярний перенос енергії у вологому матеріалі відбувається у вигляді теплоти і за рахунок масопереносу: $J^d = -\lambda \nabla T + \sum_\psi h_\psi J_\psi^d$, де h_ψ – питома ентальпія компонента ψ .

Коефіцієнт дифузії рідини визначається по формулі (3.31) [6, 48]. Коефіцієнт дифузії пари в повітрі D_p

$$D = \frac{KT^{3/2}}{Pd_{\text{мол}}^2 \sqrt{\mu}}, \quad (3.34)$$

Де K – const;

$d_{\text{мол}}$ – діаметр молекул, що дифундують;

P – тиск газу.

Враховуючи те, що коефіцієнт дифузії пари в повітрі при $T = 273$ К і $P = 100$ кПа зручно представити у вигляді

$$D_p = D_v = \frac{\gamma_p T^{3/2}}{P_r}, \quad \text{де } \gamma_p = 0,49 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (3.35)$$

Густини фільтраційних (конвективних) потоків компонентів зв'язаної речовини визначаються по співвідношенням: $J_p^f = U_p w_p$, $J_n^f = U_n w_n$, $J_{\text{нов.}}^f = U_{\text{нов.}} w_n$, де величини w_p і w_n представляють собою векторні суми швидкостей: лінійної швидкості w_l частинок м'ятки відносно корпусу апарата та швидкості фільтраційного руху рідинної w_p або газової w_n фаз. Швидкості фільтраційного руху компонентів зв'язаної речовини знаходяться по формулі Дарсі

$$w_{\psi} = - \frac{K_o K_{\psi}}{\eta_{\psi}} \nabla P_{\psi}, \quad \psi = p, g. \quad (3.36)$$

Тут K_o – загальна проникність середовища;

K_{ψ} – відносна проникність,

η_{ψ} – динамічний коефіцієнт в'язкості,

∇P_{ψ} – градієнт тиску фази ψ .

Рух частинок в апараті є складним, оскільки вектор швидкості змінюється в часі як по величині, так і за напрямком. Швидкість переміщення частинок матеріалу в чанах жаровні визначаються кутовою швидкістю мішалки і залежить від частоти її обертання, довжини лопатки мішалки та маси рухомої частинки. Врахувати ефективну швидкість матеріалу відносно корпусу чанів в математичній моделі було запропоновано шляхом визначення зміни товщини дисперсного шару м'ятки при обертанні мішалки та відповідно порозності шару. Щоб скористатись формулою (3.36) необхідно знати значення тисків рідини P_p і газу P_g в порах тіла. У [6] запропоновано наступний підхід визначення P_p і P_g . Тиск газової суміші представляється сумою парціальних тисків пари P_p і повітря $P_{пов.}$: $P_g = P_p + P_{пов.}$. З розрахунку процесу сушіння в попередній момент часу відомі значення функцій U_p , U_p , $U_{пов.}$ і T . Об'ємні частки вологої пористої системи – «скелета» Ψ_t , рідкої Ψ_j і газової Ψ_g фаз – представляються виразами: $\Psi_t = 1 - \Pi$, $\Psi_p = U_p / \rho_p$ та $\Psi_g = 1 - \Psi_t - \Psi_p$. Тут Π – пористість тіла, ρ_p – густина рідкої фази. Далі визначаються парціальні густини пари $\rho_p = U_p / \Psi_g$ і повітря $\rho_{пов.} = U_{пов.} / \Psi_g$ в тілі, а потім з рівняння стану для розріджених газів розраховуються парціальні тиски: $P_p = \rho_p R_y T / \mu_p$ і $P_{пов.} = \rho_{пов.} R_y T / \mu_{пов.}$.

Тиск рідкої фази в капілярах пористої системи буде відрізнитись від тиску газової фази на величину капілярного тиску P_k , який обумовлений силами поверхневого натягу рідини: $P_p = P_g + P_k$. Для розрахунку капілярного тиску в роботі [6] запропонована формула, згідно якої P_k визначається як середній капілярний тиск рідини в порах одиничного об'єму у заданому інтервалі радіусів пор:

$$P_k = 2\sigma(T) \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{\theta(r)}{r} F(r) dr / \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \theta(r) F(r) dr = \frac{2\sigma(T)}{r^*}, \quad r_{\min} < r^* < r_{\max}, \quad (3.37)$$

Тут $\theta(r)$ – об'ємна частка капіляру, яку займає рідина;

$F(r)$ – диференціальна функція розподілу пор по розмірах;

$\sigma(T)$ – коефіцієнт поверхневого натягу;

r^* – характерний параметр дисперсності розміру пор;

r_{\min} і r_{\max} – мінімальний і максимальний радіуси пор одиничного об'єму пористої системи.

Диференціальна функція розподілу пор по розмірах для даного матеріалу може бути знайдена з виразу для пористості $\Pi = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} F(r) dr$. З цієї функції може бути визначений параметр r^* .

Об'ємна частка рідини $\theta(r, t)$ в капілярі радіуса r у момент часу t розраховується за виразом $\theta(r, t) = 1 - (1 - \delta/r)^2$, який представляє відношення площі перетину капіляра, зайнятого рідиною, до загальної площі його перетину [6, 78]. Товщина шару конденсату δ на стінках частково заповнених капілярів визначається формулою [141]:

$$\delta = \delta^* (1 - \sqrt{1 - \varphi}). \quad (3.38)$$

Тут δ^* – середня довжина переміщення активізованої частки всередині конденсованого тіла, $\delta^* = A/(\xi n)$, A – енергія активації, ξ – коефіцієнт опору переміщенню частки, що випаровується, до вільної поверхні тіла, n – густина молекул, що випаровуються, $n = U_p N_A / \mu_p$, N_A – число Авогадро, μ_p – молярна маса;

φ – відносна вологість парогазової суміші, що контактує з шаром рідини при даній температурі, $\varphi = P_{\text{п}}/P_{\text{н}}(T)$.

В рівняння входить член I_W , що позначає потужність внутрішніх джерел субстанції. В процесах тепло- і масопереносу фазові перетворення представляються внутрішніми джерелами і енергії, і маси речовини.

Для визначення інтенсивності випаровування на зовнішній поверхні тіла застосовується вираз (3.32). Величина φ_T може знаходитись по рівнянню ізотерми десорбції для даного матеріалу, або по формулі (3.38), якщо її представити у вигляді: $\delta = \delta^* \bar{\delta} = \delta^* (1 - \sqrt{1 - \varphi_T})$, звідки $\varphi_T = \bar{\delta}(2 - \bar{\delta})$, де $\bar{\delta}$ – відносна товщина конденсату, яка дорівнює $\bar{\delta} = \delta / \delta^*$ при $0 < \delta < \delta^*$ і $\bar{\delta} = 1$ при $\delta > \delta^*$. З останнього випливає, що у першому періоді сушіння $\varphi_T = 1$.

У другому періоді сушіння об'ємна концентрація рідини на граничній поверхні пористого тіла прагне до нуля і вся рідина, що підходить до поверхні випаровується. В цьому випадку інтенсивність випаровування уздовж координати v зручно знаходити з рівняння збереження енергії для елементарного об'єму, що примикає до граничної поверхні

$$I = -D_p \left. \frac{\partial U_p}{\partial v} \right|_{v=0} - \frac{K_o K_p}{\eta_p} \frac{\partial (P_p U_p)}{\partial v} \quad (3.39)$$

Питома інтенсивність фазових перетворень в капілярах пористого тіла розраховується за виразом [6], що слідує з (3.32), якщо за умови локальної термодинамічної рівноваги, згідно до якої температура всіх контактуючих компонентів в кожній точці пористого тіла однакова, покласти $T|_{v=0} = T_c = T(x, y, z, t) = T$:

$$I_v = \gamma_v [\exp(A/RT) - 1]^{-1} (\varphi_T - \varphi). \quad (3.40)$$

Тут $\gamma_v = \varepsilon \rho_p / 4$ – об'ємний коефіцієнт випаровування;

φ – відносна вологість парогазової суміші в порах тіла.

При математичному моделюванні для визначення тиску насичення P_H в залежності від температури зручно користуватись формулою Нікітенко М.І. [6]: $P_H = N_p \sqrt{T} [\exp(A/RT) - 1]^{-1}$, де $N_p = \text{const}$, яка показує гарне узгодження з табличними даними. В інтервалі температур $0 \leq T \leq 100$ °С, коли $N_p = 0,4361 \cdot 10^{10} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{К}^{0,5})$,

максимальна похибка відхилення розрахункового від табличного значення P_n складає 3,4%.

Останній член правої частини рівняння переносу субстанції містить параметр ε_V і враховує усадку колоїдного капілярно-пористого матеріалу. Відносна об'ємна деформація ε_V представляє функцію компонентів тензора деформації системи $\varepsilon_V = (1 + \varepsilon_{11})(1 + \varepsilon_{22})(1 + \varepsilon_{33}) - 1$. Компоненти тензора деформації ε_{ii} ($i = 1, 2, 3$) визначають відносні подовження уздовж координатних осей і пов'язані з компонентами вектора зміщення u_i : $\varepsilon_{ii} = \partial u_i / \partial x_i$. Значення u_i можуть бути знайдені на основі рівнянь термоконцентраційного деформування Нікітенко М.І. [198] за умови відомих розподілів в тілі температури T , об'ємних концентрацій рідини U_p , парової фази $U_{п}$ і повітря $U_{пов}$, а також зовнішніх напруг.

Для випадку пружного деформування пористої системи при відсутності масових сил і динамічних ефектів деформації, рівняння термоконцентраційного деформування в декартових координатах x_i ($i = 1, 2, 3$) має вид

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_1} \left(G \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(G \frac{\partial u_i}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(G \frac{\partial u_i}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[G_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(G \frac{\partial u_1}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(G \frac{\partial u_2}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(G \frac{\partial u_3}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} [N(2G + 3G_1)] = 0 \end{aligned} \quad (3.41)$$

Тут G , G_1 – коефіцієнти Ляме, $G = E_y / [2(1 + \nu_{п})]$, $G_1 = E_y \nu_{п} / [(1 - 2\nu_{п})(1 + \nu_{п})]$; $\nu_{п}$ – коефіцієнт Пуасона; E_y – модуль пружності; N – термоконцентраційна функція, $N = \beta_{IT}(T - T_0) + \sum_{\Psi} \beta_{I\Psi}(\omega_{\Psi} - \omega_{\Psi 0})$ [6], де β_{IT} – коефіцієнт лінійного термічного розширення $\beta_{IT} = (\partial x / \partial T) / x$; $\beta_{I\Psi}$ – коефіцієнтами лінійної усадки, $\beta_{I\Psi} = (\partial x / \partial \omega_{\Psi}) / x$.

Функція N визначає зміну питомого об'єму тіла при вільному розширенні за рахунок процесів теплопровідності, дифузії, фільтрації, фазового та хімічного перетворення. Для тіл найпростішої геометрії (3.41) вирішено [6] аналітично.

Умови висушування зволоженої м'ятки при кондуктивному підведенні енергії забезпечують її самопропарювання в товстому шарі, внаслідок чого температура та вологовміст м'ятки змінюються досить повільно і, як показують візуальні спостереження, ці зміни майже не призводять до усадки. Таким чином можна прийняти, що $\varepsilon_V = 0$.

Розрахунковою областю при дослідженні динаміки тепломасопереносу в процесі жаріння шару м'ятки висотою H в циліндричній жаровні радіуса R , що має одну вісь симетрії для кожного чану, доцільно обрати перетин циліндра, верхньою границею якого буде поверхня $y = H, 0 \leq r \leq R$ контакту з парогазовим середовищем чану, права $0 \leq y \leq H, r = R$ і нижня $y = 0, 0 \leq r \leq R$ границі контактують з гріючою поверхнею, а ліва границя $0 \leq y \leq H, r = 0$ є зовнішньою поверхнею валу турбінної мішалки (рис. 3.13).

У відповідності до умов фізичної постановки задачі висушування зволоженої м'ятки у чанній жаровні та прийнятих припущень, рівняння переносу субстанції дещо спрощується: член, пов'язаний з усадкою

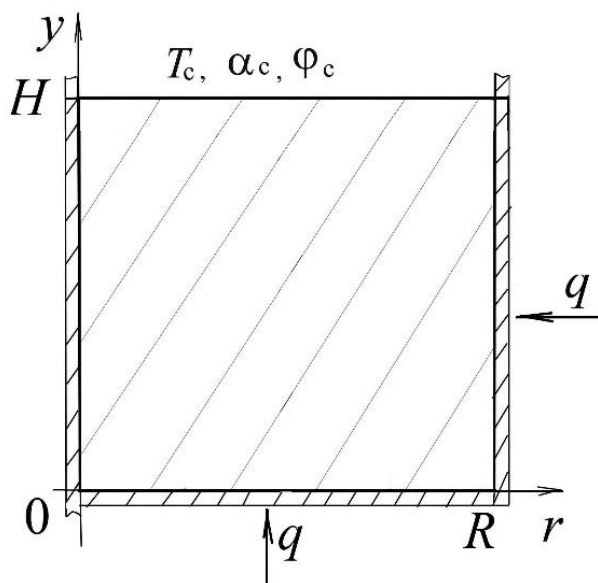


Рисунок 3.13. Розрахункова область

матеріалу можна опустити; другим членом правої частини у виразі дифузійного масо-переносу, пов'язаним з термодифузією, зазвичай можна знехтувати [130]; перенос субстанції (теплоти і маси) відбувається по висоті та уздовж радіуса дисперсного шару.

Тому математична модель тепломасопереносу і фазових перетворень при висушуванні зволоженої м'ятки в кожному чані може бути представлена в наступному вигляді:

$$c_{\text{еф}} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(w_{\text{еф}r}T)}{\partial r} + \frac{\partial(w_{\text{еф}y}T)}{\partial y} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{\text{еф}} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\text{еф}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - LI_V, \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial t} + \frac{\partial(w_{\text{ж}r}U_{\text{ж}})}{\partial r} + \frac{\partial(w_{\text{ж}y}U_{\text{ж}})}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{\text{ж}} r \frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{\text{ж}} \frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial y} \right) - I_V, \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial t} + \frac{\partial(w_{\text{п}r}U_{\text{п}})}{\partial r} + \frac{\partial(w_{\text{п}y}U_{\text{п}})}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{\text{п}} r \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{\text{п}} \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial y} \right) + I_V, \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial U_{\text{в}}}{\partial t} + \frac{\partial(w_{\text{в}r}U_{\text{в}})}{\partial r} + \frac{\partial(w_{\text{в}y}U_{\text{в}})}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{\text{в}} r \frac{\partial U_{\text{в}}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{\text{в}} \frac{\partial U_{\text{в}}}{\partial y} \right). \quad (3.45)$$

де T – температура в дисперсному шарі;

$U_{\text{ж}}, U_{\text{п}}, U_{\text{в}}$ – об'ємні концентрації рідини, пари і повітря в шарі;

L – питома теплота випаровування;

$c_{\text{еф}}$ – ефективна теплоємність шару, $c_{\text{еф}} = c_{\text{т}} \rho_{\text{т}} \Psi_{\text{т}} + c_{\text{ж}} U_{\text{ж}} + c_{\text{п}} U_{\text{п}} + c_{\text{в}} U_{\text{в}}$;

$\lambda_{\text{еф}}$ – ефективна теплопровідність дисперсного шару,

$\lambda_{\text{еф}} = \lambda_{\text{т}} \Psi_{\text{т}} + \lambda_{\text{ж}} U_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}} + \lambda_{\text{п}} U_{\text{п}} / \rho_{\text{п}} + \lambda_{\text{в}} U_{\text{в}} / \rho_{\text{в}}$;

$\Psi_{\text{т}}$ – об'ємна доля «скелета» у дисперсному шарі, $\Psi_{\text{т}} = (1 - \Pi)(1 - \varepsilon_{\text{ш}})$;

D_{ψ} – коефіцієнт дифузії компонента ψ , $\psi = \text{ж}, \text{п}, \text{в}$;

I_V – інтенсивність масообміну між фазами в дисперсному шарі;

$w_{\text{еф}k}$ – ефективна швидкість зв'язаної речовини в напрямку k ($k = y, r$),

$$w_{\text{еф}k} = [w_{\text{ж}k} c_{\text{ж}} U_{\text{ж}} + w_{\text{г}k} (c_{\text{п}} U_{\text{п}} + c_{\text{в}} U_{\text{в}})] / c_{\text{еф}}.$$

Істинні об'ємні концентрації $U_{жі}$, $U_{пі}$, $U_{ві}$ компонентів зв'язаної речовини в матеріалі (м'ятці) співвідносяться з об'ємними концентраціями у дисперсному шарі наступними співвідношеннями

$$U_{жі} = U_{ж} (1 - \varepsilon_{ш}), U_{пі} = \rho_{п} (\Psi_{г} + \varepsilon_{ш}) = U_{п} + \rho_{п} \varepsilon_{ш}, U_{ві} = \rho_{в} (\Psi_{г} + \varepsilon_{ш}) = U_{в} + \rho_{в} \varepsilon_{ш}. \quad (3.46)$$

Вологовміст м'ятки W може бути виражений через значення як істинної об'ємної концентрації рідкої фази в матеріалі $U_{жі}$, так і об'ємної концентрації рідини в дисперсному шарі $U_{ж}$:

$$W = \frac{U_{жі}}{\rho_{г}(1 - \Pi)} = \frac{U_{жі}}{\rho_{м}} = \frac{U_{ж}}{\rho_{н}}. \quad (3.47)$$

Для системи (3.42) – (3.45) необхідно задати умови однозначності.

Початкові умови. Початковими умовами процесу висушування у другому чані жаровні будуть значення температури та об'ємних концентрацій, які м'ятка набуває після вологотеплової обробки у першому чані. Кінцеве значення цих параметрів після другого чану будуть початковими умовами для наступного етапу висушування у третьому чані і т.д.

В загальному випадку початкові умови у циліндричних координатах r , у представляються у наступному вигляді

$$T(r,y,0) = T_0(r,y); U_{п}(r,y,0) = U_{п0}(r,y); U_{в}(r,y,0) = U_{в0}(r,y), \quad (3.48)$$

При пересипанні вологої олійної сировини з чану в чан можна покласти, що в момент початку кожного етапу висушування температура і концентрації компонентів у кожній точці дисперсного шару вирівнюються і дорівнюють середнім об'ємним значенням, які м'ятка досягла по закінченні попереднього етапу обробки. Тиск газової суміші в порах шару дорівнює тиску навколишнього середовища P_c .

Граничні умови тепломасообміну задаються для кожної границі розрахункової області (рис. 3.13). На поверхні $y = H$, $0 \leq r \leq R$ контакту м'ятки з газовим середовищем чану реалізуються умови третього роду:

$$\lambda_{\text{эф}} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=H} = \alpha(T|_{y=H} - T_c) - LI|_{y=H}, \quad (3.49)$$

$$D_{\text{ж}} \left. \frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial y} \right|_{y=H} + \left. \frac{\partial(w_{\text{ж}y} U_{\text{ж}})}{\partial y} \right|_{y=H} = I|_{y=H}, \quad (3.50)$$

$$-D_{\text{п}} \left. \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial y} \right|_{y=H} + \left. \frac{\partial(w_{\text{п}y} U_{\text{п}})}{\partial y} \right|_{y=H} = \gamma_{\text{п,с}} (U_{\text{п}}|_{y=H} - \rho_{\text{п,с}} \Psi_{\text{п}}), \quad (3.51)$$

$$U_{\text{в}}|_{y=H} = \frac{P_{\text{с}} \Psi_{\text{г}} \mu_{\text{в}}}{R T|_{y=H}} - U_{\text{в}}|_{y=H} \frac{\mu_{\text{в}}}{\mu_{\text{п}}}. \quad (3.52)$$

Інтенсивність фазових перетворень I визначається за формулою (3.32), коли на поверхні $y = H$ величина об'ємної концентрації рідини вища за рівноважне значення (перший період сушіння), і за виразом (3.39), коли вона досягла рівноважного, відповідно до параметрів оточуючого парогазового середовища, значення (другий період сушіння). Умова масообміну між паровою фазою всередині пористого тіла і навколишнім парогазовим середовищем (3.51) представляє рівняння балансу маси пари на зовнішній поверхні тіла. Слід зазначити, що вираз (3.51) задовільняє умовам входження пористого шару в стан рівноваги: при $t \rightarrow \infty$, густина пари в порах матеріалу дорівнює густині пари в оточуючому середовищі $\rho_{\text{п}} = \rho_{\text{п,с}}$, температура тіла на границі дорівнює температурі навколишнього середовища $T|_{y=H} = T_c$ та $\partial U / \partial y = \partial T / \partial y = 0$.

Об'ємна концентрація повітряної фази на границі $y = H$ визначається з умови, що тиск парогазової суміші у точках тіла біля цієї поверхні дорівнює тиску зовнішнього середовища: $P_{\text{г}}|_{y=H} = P_{\text{п}}|_{y=H} + P_{\text{в}}|_{y=H} = P_{\text{с}} = P_{\text{пс}} + P_{\text{вс}}$.

На границі $0 \leq y \leq H$, $r = 0$ розрахункової області (рис. 3.13) задаються умови симетрії полів температури, об'ємних концентрацій і швидкостей фаз:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial U_p}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial U_n}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial U_{ноє}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad \left. \frac{\partial w_{pr}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial w_{gr}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (3.53)$$

На правій і нижній границях розрахункової області до м'ятки підводиться кондуктивним шляхом тепловий потік, внаслідок чого відбувається теплообмін, а масо-перенос рідини, пари і повітря відсутні. Граничні умови для поверхні $0 \leq y \leq H, r = R$ представляються в такий спосіб

$$\begin{aligned} \lambda_{ст} \left. \frac{\partial T_1}{\partial \delta_{ст}} \right|_{r=R} = \lambda_{эф} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R}, \quad T_1 \Big|_{r=R} = T \Big|_{r=R} + \Delta T; \quad \left. \frac{\partial U_p}{\partial r} \right|_{r=R} = 0; \quad \left. \frac{\partial U_n}{\partial r} \right|_{r=R} = 0; \\ \left. \frac{\partial U_{ноє}}{\partial r} \right|_{r=R} = 0; \quad \left. \frac{\partial w_{pr}}{\partial r} \right|_{r=R} = 0; \quad \left. \frac{\partial w_{gr}}{\partial r} \right|_{r=R} = 0, \end{aligned} \quad (3.54)$$

і аналогічно для поверхні $y=0, 0 \leq r \leq R$:

$$\begin{aligned} \lambda_{ст} \left. \frac{\partial T_{ст}}{\partial \delta_{ст}} \right|_{y=0} = \lambda_{эф} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}, \quad T_{ст} \Big|_{y=0} = T \Big|_{y=0} + \Delta T; \quad \left. \frac{\partial U_p}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial U_n}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; \\ \left. \frac{\partial U_{ноє}}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial w_{py}}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial w_{gy}}{\partial y} \right|_{y=0} = 0. \end{aligned} \quad (3.55)$$

де $\lambda_{ст}$ – теплопровідність металу стінки; $\delta_{ст}$ – товщина стінки; ΔT – різниця температур між стінкою і м'яткою внаслідок газових прошарків, що утворюються при русі вологого шару, $\Delta T = \frac{\delta_{пр}}{\lambda_{гпр}} \partial q_{пр}$, $\delta_{пр}$ – товщина прошарку, $\lambda_{гпр}$ – теплопровідність парогазової суміші в прошарку; $q_{пр}$ – густина теплового потоку через прошарок. Система диференціальних рівнянь (3.42) – (3.45) при заданих граничних умовах (3.49) – (3.55) є істотно нелінійною, рішення якої отримати аналітичним шляхом неможливо. Для її реалізації доцільно використовувати числові методи розрахунку.

3.1.5. Чисельне рішення математичної моделі вологотеплової обробки м'ятки у багаточановій жаровні

Рівняння (3.42) – (3.45) містять дифузійні і конвективні члени. Для рішення такого роду рівнянь зазвичай використовуються неявні різницеві схеми [6]. Їх основною перевагою є стійкість отриманого рішення, але вагомим недоліком є істотна складність рішення навіть одновимірних лінійних диференційних рівнянь. В [198], М.І. Нікітенком на основі методу комбінування різницевої схем запропонована явна трьохшарова перерахункова різницева схема. Метод полягає в комбінуванні явних і неявних схем, які множаться на вагові множники і сумуються. Найбільш відомою з таких схем для рішення диференційних рівнянь параболічного типу є абсолютно стійка схема Кранка-Ніколсона. Трьохшарова перерахункова різницева схема М.І. Нікітенко розроблена шляхом комбінування різницевого рівняння переносу в явній формі для часового шару t_n та неявної схеми для шарів t_{n-1} та t_{n-2} , і процедури розщеплення [6, 78]. У відповідності до цієї схеми, апроксимація конвективного диференційного рівняння тепло- і масопереносу здійснюється двома різницевиими рівняннями

$$\frac{\bar{T}_m^{n+1} - T_m^n}{l} = -w\delta_x T_m^n, \quad (3.56)$$

$$(1 + \theta)\delta_t T_m^n - \theta\delta_\tau T_m^{n-1} = -w\delta_x \bar{T}_m^{n+1} + a\delta_{xx} \bar{T}_m^{n+1}, \quad \theta > 0, \quad (3.57)$$

де θ – ваговий параметр, $\theta > 0$.

Похідні по часу, та перша і друга похідні по координаті в різницевому вигляді розписуються наступним чином

$$\delta_t T_m^n = \frac{T_m^{n+1} - T_m^n}{l}; \quad \delta_x T_m^n = \frac{T_{m+1}^n - T_{m-1}^n}{2h}; \quad \delta_{xx} T_m^n = \frac{T_{m+1}^n + T_{m-1}^n - 2T_m^n}{h^2}. \quad (3.58)$$

Перше рівняння (3.56) дозволяє визначати зміну шуканого параметра на часовому шарі t_{n+1} внаслідок конвективного переносу, а друге (3.57) – в результаті конвективного і дифузійного переносу. Значення \bar{T}_m^{n+1} у (3.57) стає відомим з (3.56), що робить схему (3.57) явною.

Таким чином рішення рівнянь переносу по явній трьохшаровій перерахунковій різницевої схемі (3.56), (3.57) є достатньо простим, і дозволяє вибирати майже довільно кроки l і h різницевої сітки як для неявної схеми, залишаючи її стійкою.

Різницеві апроксимації диференціальних рівнянь тепломасопереносу (3.42) – (3.45) при заданих граничних умовах (3.49) – (3.55) в циліндричних координатах на двохвимірній рівномірній різницевої сітці $r_i = ih$, ($i = 0, 1, \dots, I$; $h = \text{const}$), $y_m = mh_y$, ($m = 0, 1, \dots, M$; $h_y = \text{const}$), $t_n = nl$ ($n = 0, 1, \dots, l > 0$) згідно вибраної схеми представляються у наступному вигляді:

для рівняння енергії (3.42)

$$\begin{aligned} \frac{\bar{T}_{i,m}^{n+1} - T_{i,m}^n}{l} = & - \left[\left((w_{\text{ефр}} T)_{i+1,m}^n - (w_{\text{ефр}} T)_{i,m}^n \right) - \left((w_{\text{ефр}} T)_{i,m}^n - (w_{\text{ефр}} T)_{i-1,m}^n \right) \right] / (2h^2) - \\ & - \left[\left((w_{\text{ефр}} T)_{i,m+1}^n - (w_{\text{ефр}} T)_{i,m}^n \right) - \left((w_{\text{ефр}} T)_{i,m}^n - (w_{\text{ефр}} T)_{i,m-1}^n \right) \right] / (2h_y^2), \end{aligned} \quad (3.59)$$

$$\begin{aligned} (1 + \Omega_T) \frac{\tilde{T}_{i,m}^{n+1} - \bar{T}_{i,m}^{n+1}}{l} - \Omega_T \frac{T_{i,m}^n - T_{i,m}^{n-1}}{l} = & - \left[\left((w_{\text{ефр}} \bar{T})_{i+1,m}^{n+1} - (w_{\text{ефр}} \bar{T})_{i,m}^{n+1} \right) - \right. \\ & \left. \left((w_{\text{ефр}} \bar{T})_{i,m}^{n+1} - (w_{\text{ефр}} \bar{T})_{i-1,m}^{n+1} \right) \right] / (2h^2) - \left[\left((w_{\text{ефр}} \bar{T})_{i,m+1}^{n+1} - (w_{\text{ефр}} \bar{T})_{i,m}^{n+1} \right) - \right. \end{aligned} \quad (3.60)$$

$$\begin{aligned} & \left. \left((w_{\text{ефр}} \bar{T})_{i,m}^{n+1} - (w_{\text{ефр}} \bar{T})_{i,m-1}^{n+1} \right) \right] / (2h_y^2) + \frac{1}{c_{\text{еф}}} \left\{ \frac{1}{2r_{i,m}} \left[\left(\lambda_{\text{еф}i+1,m} r_{i+1,m} + \lambda_{\text{еф}i,m} r_{i,m} \right) \left(\bar{T}_{i+1,m}^{n+1} - \bar{T}_{i,m}^{n+1} \right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \left(\lambda_{\text{еф}i,m} r_{i,m} + \lambda_{\text{еф}i-1,m} r_{i-1,m} \right) \left(\bar{T}_{i,m}^{n+1} - \bar{T}_{i-1,m}^{n+1} \right) \right] / h^2 + \left[\left(\lambda_{\text{еф}i,m+1} + \lambda_{\text{еф}i,m} \right) \left(\bar{T}_{i,m+1}^{n+1} - \bar{T}_{i,m}^{n+1} \right) - \right. \right. \\ & \left. \left. \left(\lambda_{\text{еф}i,m} + \lambda_{\text{еф}i,m-1} \right) \left(\bar{T}_{i,m}^{n+1} - \bar{T}_{i,m-1}^{n+1} \right) \right] / (2h_y^2) - I_V \right\}; \end{aligned}$$

для рівняння переносу маси рідкої фази (3.43)

$$\begin{aligned} \frac{\bar{U}_{p,i,m}^{n+1} - U_{p,i,m}^n}{l} = & - \left[\left(w_{pr} U_p \right)_{i+1,m}^n - \left(w_{pr} U_p \right)_{i,m}^n \right] - \left[\left(w_{pr} U_p \right)_{i,m}^n - \left(w_{pr} U_p \right)_{i-1,m}^n \right] / (2h^2) - \\ & - \left[\left(w_{py} U_p \right)_{i,m+1}^n - \left(w_{py} U_p \right)_{i,m}^n \right] - \left[\left(w_{py} U_p \right)_{i,m}^n - \left(w_{py} U_p \right)_{i,m-1}^n \right] / (2h_y^2), \end{aligned} \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} (1 + \Omega_p) \frac{\tilde{U}_{p,i,m}^{n+1} - \bar{U}_{p,i,m}^{n+1}}{l} - \Omega_p \frac{U_{p,i,m}^n - U_{p,i,m}^{n-1}}{l} = & - \left[\left(w_{pr} \bar{U}_p \right)_{i+1,m}^{n+1} - \left(w_{pr} \bar{U}_p \right)_{i,m}^{n+1} \right] - \\ & \left[\left(w_{pr} \bar{U}_p \right)_{i,m}^{n+1} - \left(w_{pr} \bar{U}_p \right)_{i-1,m}^{n+1} \right] / (2h^2) - \left[\left(w_{py} \bar{U}_p \right)_{i,m+1}^{n+1} - \left(w_{py} \bar{U}_p \right)_{i,m}^{n+1} \right] - \\ & - \left[\left(w_{py} \bar{U}_p \right)_{i,m}^{n+1} - \left(w_{py} \bar{U}_p \right)_{i,m-1}^{n+1} \right] / (2h_y^2) + \frac{1}{2r_{i,m}} \left[\left(D_{p,i+1,m} r_{i+1,m} + D_{p,i,m} r_{i,m} \right) \left(\bar{U}_{p,i+1,m}^{n+1} - \bar{U}_{p,i,m}^{n+1} \right) - \right. \\ & \left. - \left(D_{p,i,m} r_{i,m} + D_{p,i-1,m} r_{i-1,m} \right) \left(\bar{U}_{p,i,m}^{n+1} - \bar{U}_{p,i-1,m}^{n+1} \right) \right] / h^2 + \left[\left(D_{p,i,m+1} + D_{p,i,m} \right) \left(\bar{U}_{p,i,m+1}^{n+1} - \bar{U}_{p,i,m}^{n+1} \right) - \right. \\ & \left. - \left(D_{p,i,m} + D_{p,i,m-1} \right) \left(\bar{U}_{p,i,m}^{n+1} - \bar{U}_{p,i,m-1}^{n+1} \right) \right] / (2h_y^2) - I_V. \end{aligned} \quad (3.62)$$

Аналогічним чином записуються різницеві апроксимації переносу маси пари (3.44) і повітря (3.45).

У вузлових точках $(i, 1)$ на границі розрахункової області $y = 0$, $0 \leq r \leq R$ друге рівняння (3.62) різницевої апроксимації диференційного рівняння енергії (3.42) з урахуванням повітряного прошарку товщиною δ_{np} між днищем і вологим шаром та коефіцієнтом теплопровідності λ_{rnp} представляється у наступний спосіб

$$\begin{aligned} (1 + \Omega_T) \frac{\tilde{T}_{i,1}^{n+1} - \bar{T}_{i,1}^{n+1}}{l} - \Omega_T \frac{T_{i,1}^n - T_{i,1}^{n-1}}{l} = & - \left[\left(w_{\text{efr}} \bar{T} \right)_{i+1,1}^{n+1} - \left(w_{\text{efr}} \bar{T} \right)_{i,1}^{n+1} \right] - \\ & \left[\left(w_{\text{efr}} \bar{T} \right)_{i,1}^{n+1} - \left(w_{\text{efr}} \bar{T} \right)_{i-1,1}^{n+1} \right] / (2h^2) - \left[\left(w_{\text{efy}} \bar{T} \right)_{i,2}^{n+1} - \left(w_{\text{efy}} \bar{T} \right)_{i,1}^{n+1} \right] - \\ & - \left[\left(w_{\text{efy}} \bar{T} \right)_{i,1}^{n+1} - \left(w_{\text{efy}} \bar{T} \right)_{i,2}^{n+1} \right] / (2h_y^2) + \frac{1}{c_{\text{ef}}} \left\{ \frac{1}{2r_{i,1}} \left[\left(\lambda_{\text{ef}i+1,1} r_{i+1,1} + \lambda_{\text{ef}i,1} r_{i,1} \right) \left(\bar{T}_{i+1,1}^{n+1} - \bar{T}_{i,1}^{n+1} \right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \left(\lambda_{\text{ef}i,1} r_{i,1} + \lambda_{\text{ef}i-1,1} r_{i-1,1} \right) \left(\bar{T}_{i,1}^{n+1} - \bar{T}_{i-1,1}^{n+1} \right) \right] / h^2 + \left[\frac{\left(\lambda_{\text{ef}i,2} + \lambda_{\text{ef}i,1} \right)}{2h_y} \left(\bar{T}_{i,2}^{n+1} - \bar{T}_{i,1}^{n+1} \right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{1}{\frac{h_y}{\lambda_{\text{ef}i,1}} + \frac{\delta_{np}}{\lambda_{rnp}}} \left(\bar{T}_{i,1}^{n+1} - \bar{T}_{\text{ст}}^{n+1} \right) \right] / (h_y + \delta_{np}) - I_V \right\}. \end{aligned} \quad (3.63)$$

Погрішність апроксимації вибраних різницевих схем має порядок $l + h^2 + h_y^2$.

Необхідні умови стійкості різницевих рівнянь 3.61) – (2.63):

$$l \leq \left\{ \frac{(1 + 2\Omega)}{[2\nu(h^{-2} + h_y^{-2})]}; \left(\frac{w_r}{h} + \frac{w_y}{h_y} \right)^{-1} \right\}, \quad (3.64)$$

де параметр ν для рівняння енергії приймає значення $\lambda_{\text{еф}}/c_{\text{еф}}$, для рівнянь переносу маси рідини, пари і повітря відповідно значення D_p , $D_{\text{п}}$, $D_{\text{нов}}$. Також, в рівняння масо-переносу підставляються відповідні значення компонентів швидкості фаз w_{pk} , $w_{\text{тк}}$ зв'язаної речовини, а в рівняння енергії – ефективну швидкість речовини $w_{\text{ефк}}$ ($k = r, y$).

Ваговий параметр θ дозволяє збільшити крок за часом. Як показують числові досліди, без суттєвого погіршення точності рішення, θ можна прийняти у межах $1 \div 3$.

Розрахунковий крок за часом l для сумісного вирішення системи рівнянь (3.42) – (3.45) числовим методом вибирається після визначення кроку l_{ψ} по (3.64) для кожного з рівнянь – переносу енергії ($\psi = T$), маси рідини ($\psi = p$), маси пари ($\psi = \text{п}$) та маси повітря ($\psi = \text{пов}$) – як мінімальний з l_{ψ} ($\psi = T, p, \text{п}, \text{пов}$).

Різницеві рівняння, що апроксимують граничні умови дифузійно-фільтраційного тепломасопереносу (3.49) – (3.52) для граничної поверхні, яка лежить у координатній площині $x_1 = 0$, представляються у вигляді

$$\lambda \frac{T_{i,M-1}^{n+1} - T_{i,M}^{n+1}}{h_y} = \alpha(T_{i,M}^{n+1} - T_c) - L\gamma_c \left\{ \varphi_{\text{т}} \left[\exp\left(\frac{A}{R_y T_{i,M}^n}\right) - 1 \right]^{-1} - \varphi_c \left[\exp\left(\frac{A}{R_y T_c}\right) \right]^{-1} \right\}, \quad (3.65)$$

$$D_p \left(\frac{U_{pi,M-1}^{n+1} - U_{pi,M}^{n+1}}{h_y} + \delta_{\text{ж}} \frac{T_{i,M-1}^{n+1} - T_{i,M}^{n+1}}{h_y} \right) + U_{pi,M} \frac{K_0 K_p}{\eta_p} \times \\ \times \frac{P_{pi,M-1}^n - P_{pi,M}^n}{h_y} = \gamma_c \left\{ \varphi_m \left[\exp\left(\frac{A}{R_y T_{i,M}^n}\right) - 1 \right]^{-1} - \varphi_c \left[\exp\left(\frac{A}{R_y T_c}\right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (3.66)$$

$$D_{\Pi} \left(\frac{U_{\Pi i, M-1}^{n+1} - U_{\Pi i, M}^{n+1}}{h_y} + \delta_{\Pi} \frac{T_{i, M-1}^{n+1} - T_{i, M}^{n+1}}{h_y} \right) + U_{\Pi i, M} \frac{K_0 K_{\Pi}}{\eta_{\Pi}} \frac{P_{\Pi i, M-1}^n - P_{\Pi i, M}^n}{h_y} =, \quad (3.67)$$

$$= -\gamma_{\text{пс}} (U_{\Pi i, M} - \rho_{\text{пс}} \Psi_{\Gamma})$$

$$U_{\text{в} i, M} = \frac{P_{\text{с}} \Psi_{\Gamma} \mu_{\text{в}}}{R_y T_{i, M}} - U_{\Pi i, M} \frac{\mu_{\text{в}}}{\mu_{\Pi}}. \quad (3.68)$$

У процесі рішення задачі тепломасопереносу при жарінні м'ятки, значення компонентів вектора фільтраційної швидкості w , а також коефіцієнтів $\lambda_{\text{еф}}$, D_p , D_{Π} і $D_{\text{пов}}$ змінюються. Тому умови стійкості (2.62) перевіряються перед кожним часовим кроком.

3.1.6 Розробка алгоритму розрахунку диференціальних рівнянь математичних моделей

На базі розроблених **математичної моделі** динаміки процесів тепломасопереносу і фазових перетворень при жарінні дисперсного шару пористого матеріалу в багаточанній жаровні і **числового методу** її реалізації створено програмний комплекс, що об'єднує підпрограми розрахунку процесу для кожного чану. В основі побудови програмного комплексу лежить такий алгоритм.

Алгоритм розрахунку. Сіткові функції T_{km}^n , U_{pkm}^n , $U_{\Pi km}^n$, $U_{\text{нов} km}^n$, які характеризують стан вологої дисперсної системи і представляють наближені рішення рівнянь (3.22) – (3.25) при граничних умовах (3.28) – (3.30) визначаються у наступній послідовності.

1. Задаються вихідні дані, що враховують природу вологого матеріалу (теплофізичні властивості та пористість), початковий (T_{km}^0 , U_{pkm}^0 , $U_{\Pi km}^0$, $U_{\text{нов} km}^0$) та кінцевий стани, геометричні характеристики (форму, розміри та порозність дисперсного шару), енергія активації та дифузійні коефіцієнти, параметри парогазової суміші, що контактує з вологим матеріалом у чані, температура та тиск глухої пари, теплопровідність та розміри стінок чанів.

2. Обчислюються величини, які в процесі рахунку залишаються незмінними та визначаються в залежності від геометрії і теплофізичних параметрів пористого матеріалу ($\gamma_c, \gamma_v, \epsilon_{ш}, W_0$ та ін.).

3. В пам'яті ПЕОМ створюється два однакових масиви комірок W_{km}^n та W_{km}^{n+1} ($W = T, W, U_p, U_{п}, U_{пов.}, P, P_{п}, P_{пов.}, \phi_T, \rho_{п}, \rho_{пов.}$) для фіксування в них початкових ($n = 0$) значень сіткових функцій $T_0, W_0, U_{p0}, U_{п0}, U_{пов0}, P_0, P_{п0}, P_{пов0}, \rho_{п0}, \rho_{пов0}$ і поточних ($n > 0$), що знаходяться на кожному наступному часовому кроці в результаті рішення системи різницевих рівнянь після завдання кроків різницевої сітки.

4. Проводяться операції по визначенню кроків різницевої сітки:

– задається кількість кроків по координатам і визначаються їх розміри;
– для кожного різницевого рівняння визначаються умови стійкості відповідно до першого виразу (3.40) і вибирається мінімальне з отриманих значення кроку по часу l_0 ;

– створюється цикл по просторовим координатам i та m для обчислення швидкостей конвективного руху компонентів зв'язаної речовини;

– визначається значення часового кроку l_ψ у відповідності до другого виразу (3.40) і остаточно уточнюється величина l кроку як мінімальний з l_ψ ($\psi = T, p, п, пов$).

5. Обчислюється час $t_{n+1} = t_n + l = (n+1)l$ та задані в залежності від часу функції, які входять в різницеві апроксимації умов на зовнішніх границях матеріалу.

6. Обчислюються величини, які залежать від локальних значень об'ємних концентрацій компонентів зв'язаної речовини та температури шару пористого матеріалу та входять в формули, які замикають систему диференціальних рівнянь (3.9), (3.10), (3.12)–(3.18).

7. Значення $\bar{T}_{im}^{n+1}, \bar{U}_{pim}^{n+1}, \bar{U}_{пim}^{n+1}$ та $\bar{U}_{новim}^{n+1}$ для внутрішніх точок шару обраховуються по явним різницеvim рівнянням виду (3.35), (3.37) у першому наближенні без урахування молекулярного механізму переносу кожної субстанції. За різницеvim рівняннями виду (3.36), (3.38) визначаються функції $\tilde{T}_{im}^{n+1}, \tilde{U}_{pim}^{n+1}, \tilde{U}_{пim}^{n+1}$ та $\tilde{U}_{новim}^{n+1}$ в другому наближенні, де визначається на них вплив дифузійного і фільтраційного механізмів переносу.

8. Обраховуються значення на часовому кроці $n+1$ шуканих функцій T , U_p , U_{Π} , $U_{\text{пов}}$, для кожної граничної поверхні в окремо створених циклах.

9. Знайдені на шарі $n+1$ значення шуканих функцій служать вихідними даними для наступного кроку вздовж координати z .

10. Середні значення U_p^{n+1} , U_{Π}^{n+1} , $U_{\text{пов}}^{n+1}$ і T^{n+1} обчислюються через знайдені за рівняннями виду (3.37) – (3.40) значення сіткових функцій $\bar{U}_{km_p}^{n+1}$, $\bar{U}_{km_{\Pi}}^{n+1}$ і \bar{T}_{km}^{n+1} за допомогою формули трапецій. Ці величини в кінці кожного етапу волого-теплової обробки у даному чані є вихідними для наступного етапу обробки.

Створені програмні комплекси дозволяють досліджувати динаміку і кінетику висушування м'ятки рицини в чанній жаровні, оцінюючи вплив на інтенсивність проходження процесу різних параметрів.

3.1.7 Результати визначення кінетики і динаміки зневоднення і пропарювання м'ятки в багаточанній жаровні

На основі розроблених математичної моделі і числового методу рішення диференціальних рівнянь проведений розрахунок динаміки і кінетики висушування м'ятки рицини в дослідній семичанній жаровні з внутрішнім діаметром 1 м [147]. Висота шару м'ятки в кожному чані у нерухомому стані складала $h = 0,21$ м. З даних проведеного розрахунку гідродинаміки мезги в чанній жаровні при вологотепловій підготовці до вилучення олії, відстань яку проходить частинка м'ятки при обертанні турбінної мішалки з частотою 50 об/хв дорівнює 1 м (рис. 3.14). Рухаючись спочатку горизонтально уздовж лопатки мішалки, а потім відриваючись від неї вертикально, паралельно бічній стінці чана, частинки олійної сировини піднімаються на висоту 0,5 м, створюючи разом шар з зазначеною середньою висотою H (рис. 3.14). В залежності від шляху вертикального руху частинок збільшується порозність дисперсного шару

$$\varepsilon_{\text{ш}} = 1 - \frac{h}{H}. \quad (3.69)$$

Для товщини $H = 0,5$ м порозність шару дорівнює $\varepsilon_{ш} = 0,6$. Площа нагріву м'ятки в кожному чані, з урахуванням нижньої і бічної поверхонь, складає $2,355 \text{ м}^2$.

Пара, що утворюється в процесі висушування, видаляється через відвідну трубу, підведену до кожного чану жаровні. Тобто можна покласти, що відносна вологість та температура парогазової суміші, що контактує з вологим шаром в кожному чані будуть незмінними.

На основі хімічного складу м'ятки рицини розраховано питому теплоємність її сухої жирної речовини $c_T = 1,915 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$. Решта фізичних характеристик м'ятки визначались з [147, 148]: $\lambda_T = 0,15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\rho_m = 1025 \text{ кг/м}^3$; $\Pi = 0,385$. Дані по рівноважному вологовмісту олійної сировини W_p , що необхідні при визначенні вологості тіла φ_T , яка входить у формули для інтенсивності випаровування рідини на поверхні і в порах матеріалу досить добре апроксимуються залежністю $W_p = 20,3\varphi^3 - 3,2\varphi^2 + 3,03$.

Початкові параметри дисперсного шару м'ятки і контактуючого газового середовища: $T_0 = 83 \text{ }^\circ\text{C}$; $W_0 = 13,5 \%$; $U_{0ж} = 55,4 \text{ кг/м}^3$ (у відповідності до першого з виразів (3.26) та (3.27) початкова істинна об'ємна концентрація рідини у м'ятці $U_{0жі} = 138,5 \text{ кг/м}^3$); $T_c = 75 \text{ }^\circ\text{C}$; $P_c = 0,1 \text{ МПа}$; $P_{пс} = 0,25 \text{ МПа}$; $A = A_D = 0,4205 \cdot 10^8 \text{ Дж/кмоль}$. Тривалість вологотеплової обробки в кожному чані дослідної жаровні однакова і складає 514 с. Загальний час обробки 60 хв, в якому жарінню в шести чанах відведено 54 хв.

Розрахунок на базі системи рівнянь (3.22) – (3.25) при умовах однозначності (3.28) – (3.31) охоплював весь процес зневоднення м'ятки в шести чанах жаровні (з другого по сьомий). Верифікація математичної моделі проводилась шляхом порівняння результатів математичного моделювання з результатами, отриманими з розрахунків матеріального і теплового балансів для кожного чану в процесі висушування м'ятки. На рис. 2.10 представлено отримані на базі математичного моделювання графіки середніх значень вологовмісту і температури м'ятки в процесі повного циклу висушування в багаточанній жаровні та результати балансових розрахунків дискретних значень середнього вологовмісту м'ятки після кожного чану жаровні та її початкової температури. Криві зміни вологовмісту мають періоди постійної і падаючої швидкості, що відповідає реальному проходженню процесу. Середня температура м'ятки в процесі висушування досить істотно підвищується при кожному пересипанні в наступний чан, що можна пояснити збільшенням

кількості окремих частинок дисперсного шару, що потрапляють в зону контакту з гріючими глухою парою поверхнями чану. Температура м'ятки протягом висушування у другому і третьому чанах спочатку дещо знижується внаслідок інтенсивного випаровування води з шарів, що контактують з гріючими поверхнями, а потім підвищується. Це можна пояснити частковою конденсацією пари на віддалених від поверхонь теплообміну частинках сировини. В наступних чанах відбувається поступальне вирівнювання середньої температури всіх частинок дисперсного шару м'ятки і процесу конденсації пари не спостерігається. Пропарювання м'ятки супроводжується переносом парової фази до зовнішньої поверхні шару і вихід її в навколишнє середовище. При цьому середня температура зволоженої сировини в кожному чані жаровні монотонно незначно знижується.

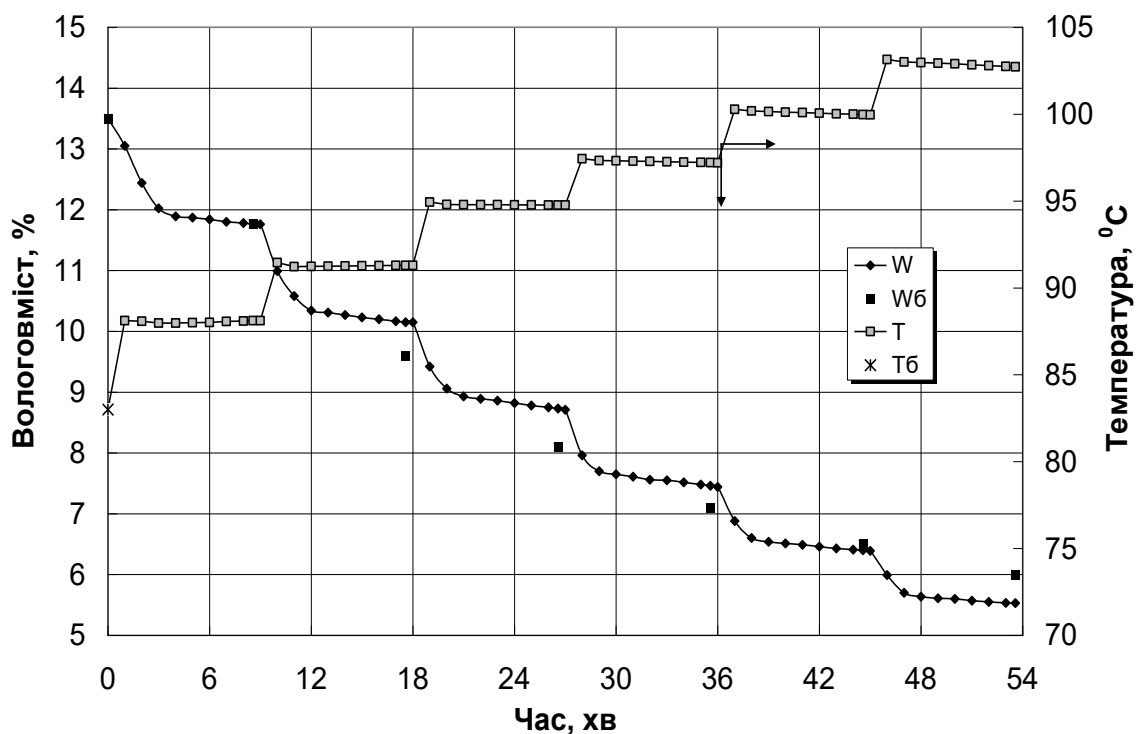


Рисунок 3.14. Зміна в часі середніх значень температури і вологовмісту м'ятки в процесі висушування в багаточанній жаровні отримані на базі математичної моделі (лінії) та шляхом балансових розрахунків (точки)

В процесі пропарювання дисперсного шару в кожному чані середня температура матеріалу дещо знижується внаслідок випаровування вологи, а також в результаті прямого виходу пари, що утворюється, з жаровні в навколишнє середовище. Значення середнього вологовмісту м'ятки в кінці кожного етапу висушування при вибраній тривалості

обробки отримані шляхом числових та балансових розрахунків досить добре узгоджуються. Максимальна похибка відхилення складає 7%. Кінцевий вологовміст і температура сировини у попередньому чані є початковими для математичного моделювання процесу висушування в наступному чані. Поля локальних значень температури та концентрації вологи по об'єму дисперсного шару м'ятки кожного чану при сформульованих фізичних і геометричних умовах однозначності можуть бути істотно нерівномірними. Результати математичного моделювання динаміки тепло- і масопереносу в процесі висушування м'ятки це підтверджують.

На рис. 3.15 – 3.17 зображено розрахункові криві зміни об'ємної концентрації рідкої фази $U_{ж}$ по товщині дисперсного шару H (рис. 3.13) м'ятки у характерних перетинах уздовж радіальної координати r кожного чану жаровні в момент часу 8 хв. Розглянуто середній перетин $r=R/2$ (рис. 3.15) і граничні випадки – біля гарячої бічної поверхні $r=R$ (рис. 3.16) та біля поверхні $r=0$ валу турбінної мішалки (рис. 3.17). При проведенні числових експериментів просторова сітка по товщині H будувалась на 8 кроків, тобто крок по товщині $h_y=H/8$. Вузлова точка 1 для кожного чану відповідає поверхні $y=0$ контакту м'ятки з днищем, а точка 9 – поверхні $y=H$ контакту з газовим середовищем, в яке потрапляє пара, що утворюється при жарінні.

Момент часу 8 хв відповідає майже закінченню процесу висушування мезги у кожному чані. У періоді падаючої швидкості сушіння концентрація рідкої фази на поверхні матеріалу, що контактує з зовнішнім газовим середовищем дорівнює рівноважному значенню. Таким чином об'ємна концентрація рідини U_p у вузлових точках 9 відповідає рівноважному значенню при заданій температурі T_c і відносній вологості φ_c газового середовища в чанах. При контакті м'ятки з гарячими днищами чанів (точка 1) відбувається її інтенсивне зневоднення. Відповідно об'ємна концентрація U_p знижується швидше, ніж у внутрішніх точках.

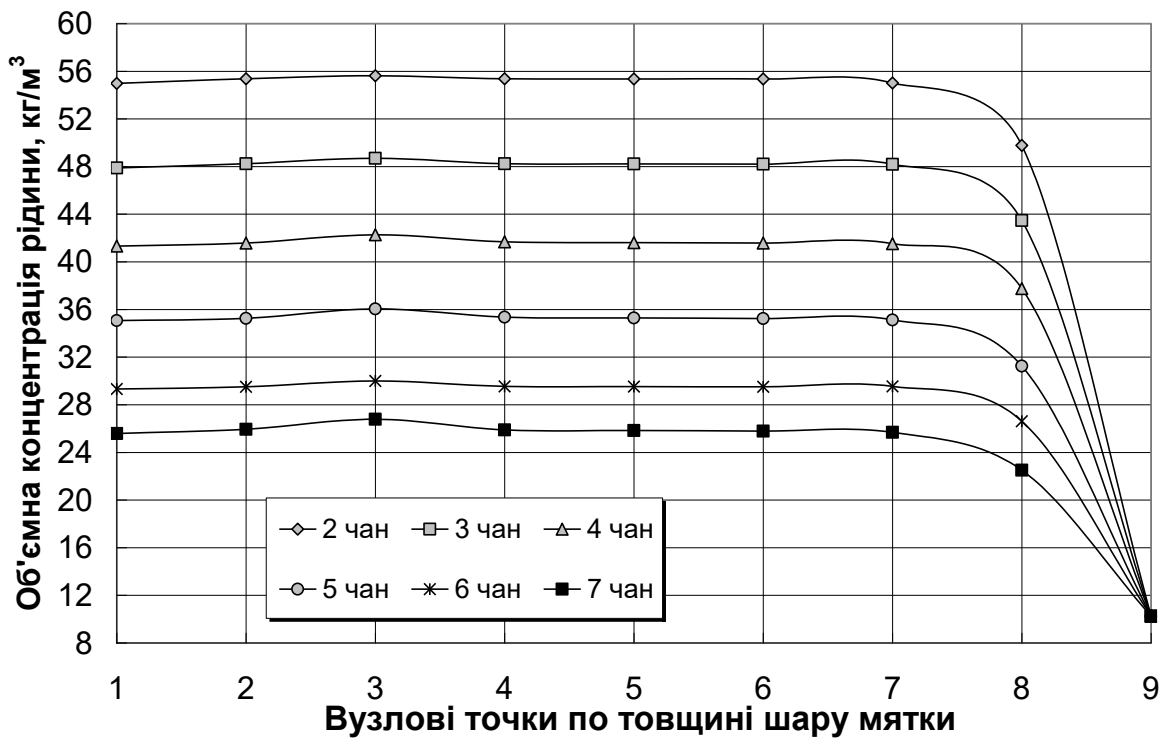


Рисунок 3.15. Зміна об'ємної концентрації рідкої фази U_p при висушуванні м'ятки в перерізі $r=R/2$, $0 \leq y \leq H$ у кожному чані в момент часу 8 хв.

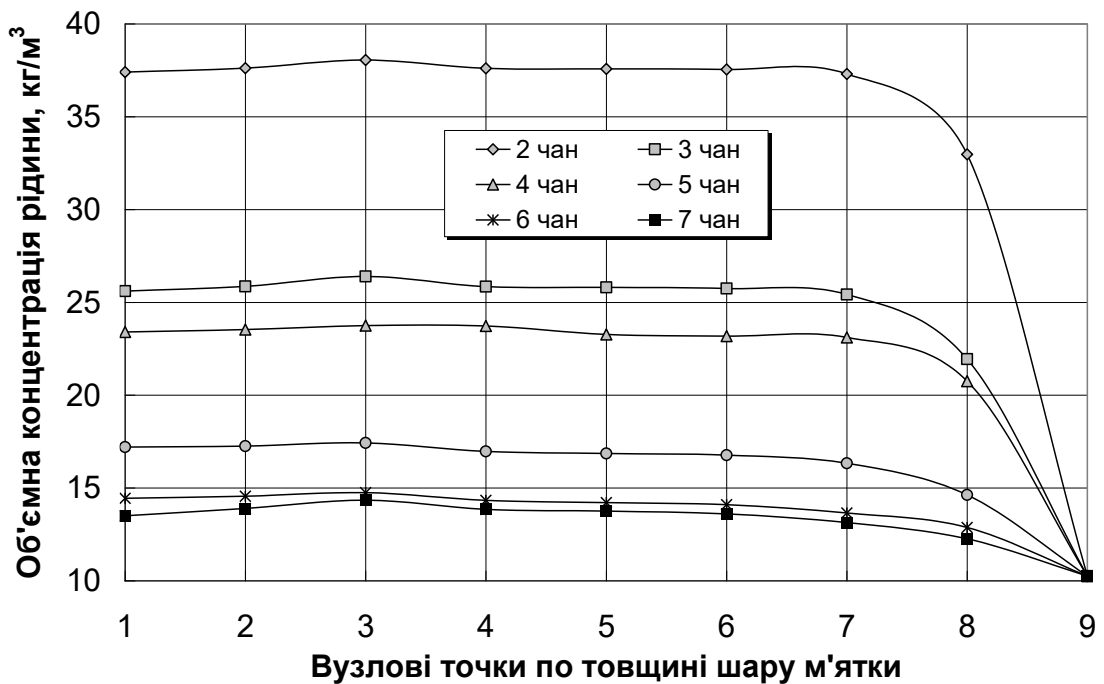


Рисунок 3.16. Зміна об'ємної концентрації рідкої фази U_p при висушуванні м'ятки в перерізі $r=R$, $0 \leq y \leq H$ у кожному чані в момент часу 8 хв.

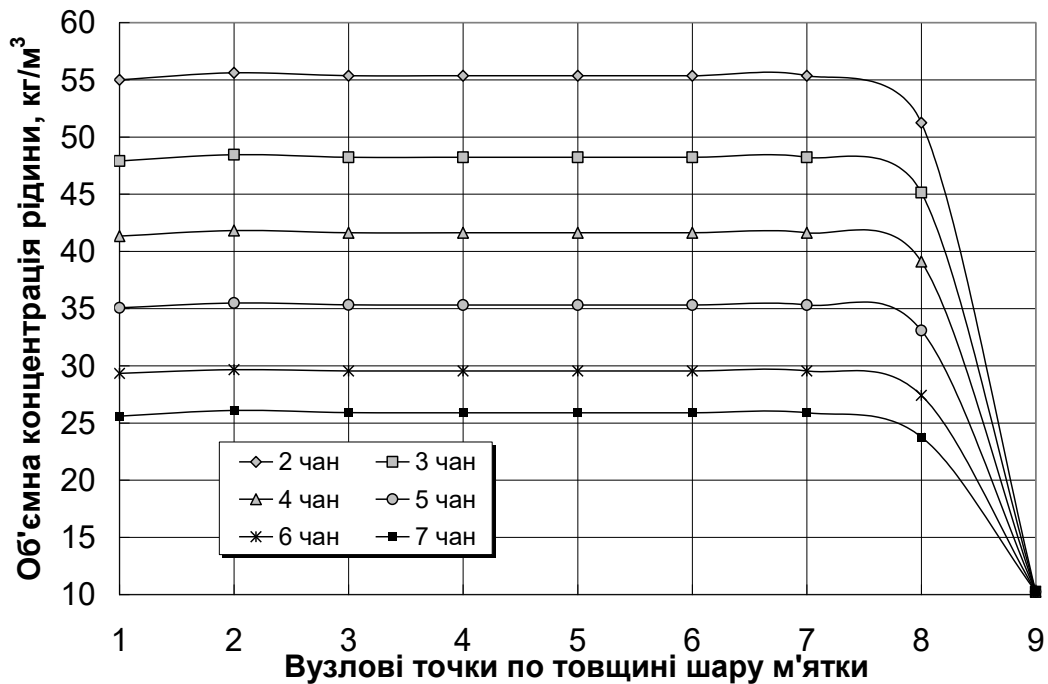


Рисунок 3.17. Зміна об'ємної концентрації рідкої фази U_p при висушуванні м'ятки в перерізі $r=0$, $0 \leq y \leq H$ у кожному чані в момент часу 8 хв

Пара, що утворюється в прилеглих до днищ шарах, досить вільно проходить крізь дисперсний шар, частково конденсуючись та підвищуючи вологовміст, і відповідно $U_{ж}$ середніх прошарків.

Це явище спостерігається на всіх етапах висушування м'ятки – і у внутрішніх перетинах (рис. 3.16, 3.18) шару, і у перетині $r=R$ біля бічної стінки чанів (рис. 3.17), де зневоднення проходить більш інтенсивно. В кожному наступному чані початкова об'ємна концентрація рідини в м'ятці нижча, ніж у попередньому – процес висушування супроводжується поступовим зневодненням сировини.

На рис. 3.18 – 3.20 представлено криві зміни температури по товщині H шару м'ятки на кожному етапі висушування в тих же характерних перетинах уздовж радіусу чанів в момент 8 хв.

У внутрішніх перетинах $r=0$ (рис. 2.15) і $r=R/2$ (рис. 3.20) характер зміни температури збігається – найбільших значень м'ятка досягає у вузлових точках біля днища чанів (1), в середніх точках шарів в результаті часткової конденсації пари температура помітно не змінюється і мінімальні значення мають місце на зовнішній границі шарів $y=H$ (точки 9).

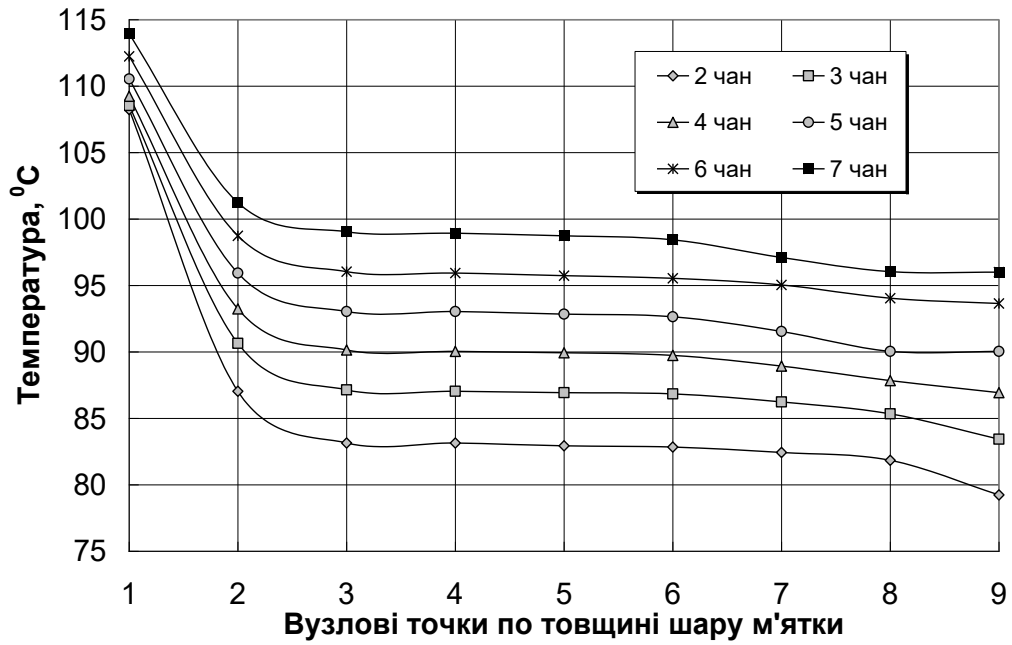


Рисунок 3.18. Зміна температури T м'ятки по товщині шару у перерізі $r = R/2$, $0 \leq y \leq H$ кожного чану в процесі висушування в момент часу 8 хв.

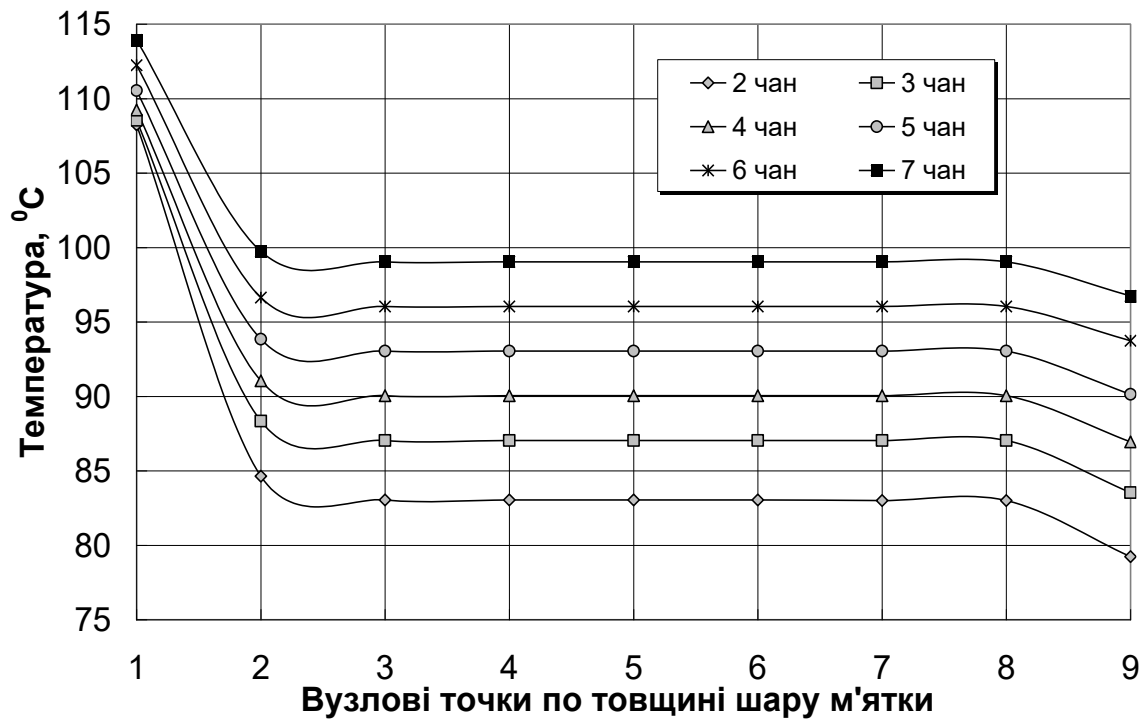


Рисунок 3.19. Зміна температури T м'ятки по товщині шару у перерізі $r = 0$, $0 \leq y \leq H$ кожного чану в процесі висушування в момент часу 8 хв

Максимальна температура олійної сировини досягається в областях її контакту з бічними гріючими поверхнями чанів (рис. 3.19). Вона перевищує температуру м'ятки біля днищ чанів, оскільки лопатки турбінної мішалки створюють між вологим шаром і днищем газовий прошарок і запобігають його тривалому контакту з гарячою поверхнею.

Термічний опір контакту м'ятки з бічними поверхнями чанів буде меншим, за рахунок центробіжної сили, що створює турбіна, та спрямовує частинки розташовані біля днища саме у радіальному напрямку, де вони досягають бічної гріючої поверхні, вздовж якої потім рухаються вгору. Область біля бічних поверхонь чанів є найбільш критичною з точки зору збереження корисних властивостей м'ятки.

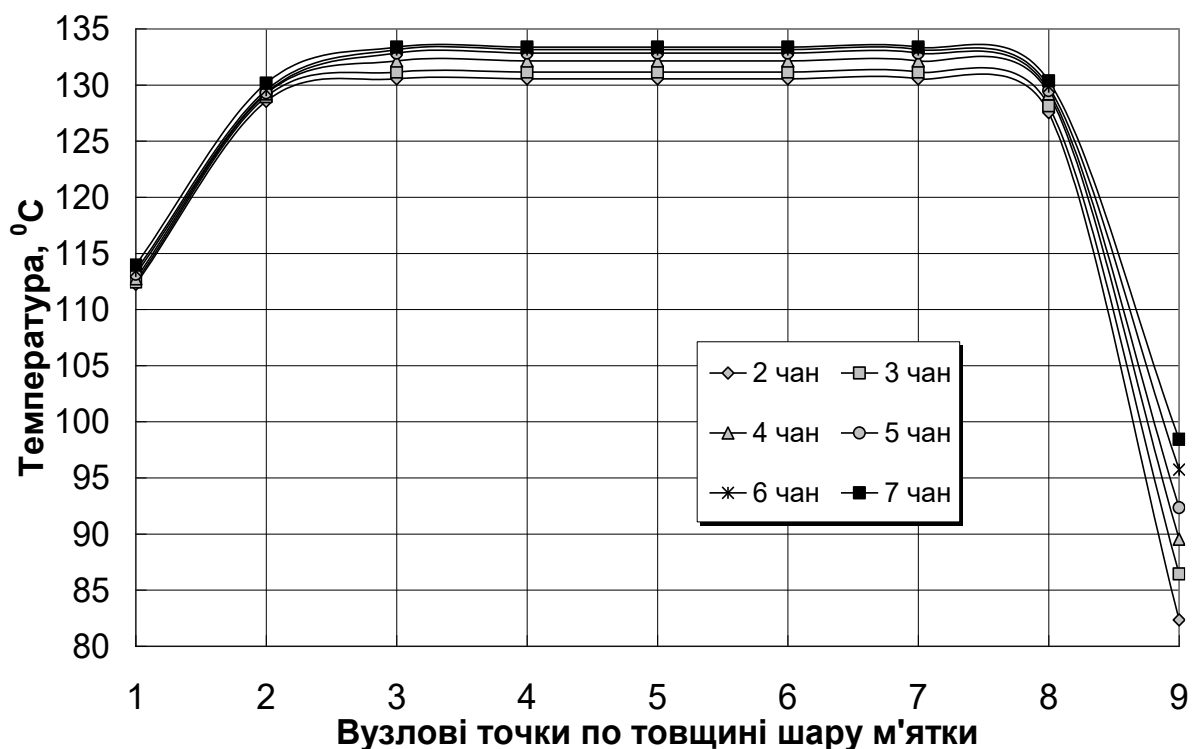


Рисунок 3.20. Зміна температури T м'ятки по товщині шару у перерізі $r=R$, $0 \leq u \leq H$ кожного чану в процесі висушування в момент часу 8 хв

Кутова швидкість обертання мішалки змінює ефективну товщину дисперсного шару м'ятки та відповідно його загальну порозність. Для оцінки впливу цих параме-

трів на інтенсивність нагрівання і зневоднення м'ятки в процесі жаріння було проведено числові експерименти для різних значень товщини шару H , які згідно (3.39) визначали порозність $\varepsilon_{ш}$ шару.

Розглядались випадки: $H = 0,4$ м, $\varepsilon_{ш} = 0,5$ (криві 1); $H = 0,5$ м, $\varepsilon_{ш} = 0,6$ (криві 2); $H = 0,3$ м, $\varepsilon_{ш} = 0,33$ (криві 3). Температура поверхонь теплообміну чану задавалась 150 °С.

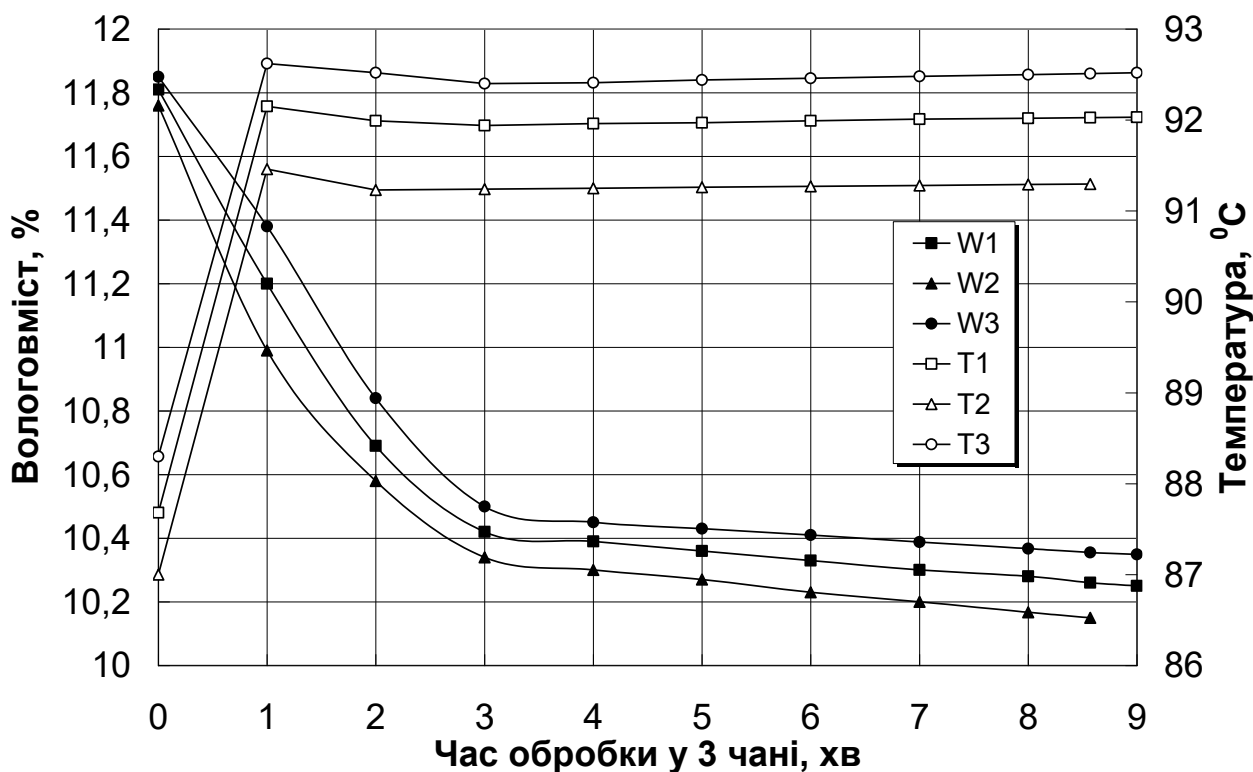


Рисунок 3.21. Графіки зміни середніх значень вологовмісту та температури м'ятки в процесі висушування у третьому чані для різних значень товщини і порозності дисперсного шару: $H = 0,4$ м, $\varepsilon_{ш} = 0,5$ (криві 1); $H = 0,5$ м, $\varepsilon_{ш} = 0,6$ (криві 2); $H = 0,3$ м, $\varepsilon_{ш} = 0,33$ (криві 3)

На рис. 3.21 зображено розрахункові криві зміни в часі середніх вологовмісту W і температури T м'ятки при висушуванні у третьому чані жаровні для вказаних значень H і $\varepsilon_{ш}$. Криві з позначенням 2 відповідають таким же умовам жаріння, що і результати кінетики і динаміки, які представлені на рис. 3.14 – 3.20. При зменшенні товщини вологого матеріалу (криві 1 і 3), його прогрівання стає швидшим. Однак зме-

ншення об'єму транспортних пор у дисперсному шарі сприяє ускладненню пароавідведення та сповільнює зниження середнього вологовмісту м'ятки в процесі висушування. Вплив геометричних характеристик H і $\varepsilon_{ш}$ дисперсного шару на зміну середніх вологовмісту W і температури T м'ятки в інших чанах жаровні має аналогічну картину.

В залежності від масштабів олійного виробництва доцільно використовувати апарати волого-теплової обробки олійної сировини оптимальної продуктивності. Продуктивність багаточанної жаровні можна регулювати шляхом зміни геометричних параметрів чанів. Розроблена математична модель дозволяє розраховувати процес висушування в апаратах циліндричної конфігурації будь-яких розмірів, задаючи їх при побудові різницевої сітки. На основі математичної моделі проведено розрахунок процесу висушування м'ятки рицини в апараті, який містить 7 чанів діаметром 1,58 м. В першому чані відбувається зволоження мезги, а в наступних чанах здійснюється її пропарювання і зневоднення. Вихідні параметри м'ятки після зволоження та товщина нерухомого дисперсного шару приймалися такими ж як для попередніх розрахунків. Висота дисперсного шару при обертанні турбінної мішалки покладалась $H = 0,5$ м, що відповідає порозності шару $\varepsilon_{ш} = 0,6$. На рисунку 3.22 представлено результати розрахунку середніх вологовмісту і температури м'ятки в процесі повного циклу зневоднення в 6 чанах.

Час висушування в кожному чані приймався однаковим і визначався часом досягнення середнього вологовмісту м'ятки $W = 11,76$ % наприкінці обробки у другому чані, у відповідності до проведених в роботі балансових розрахунків.

Порівнюючи представлені результати з даними на рисунку 3.6, що отримані для жаровні з чанами радіусом 1 м, можна зробити наступні висновки. Тривалість зневоднення м'ятки рицини у другому чані до зазначеного вологовмісту збільшилась на 40 % при збільшенні діаметру чана на 60 % та при однакових інших умовах. Це пояснюється тим, що більший об'єм вологого матеріалу повільніше прогрівається: середня температура м'ятки після другого чану діаметром 1 м складала 88 °С, наприкінці процесу 103 °С, а відповідні значення температури, що досягав матеріал у жаровні з чанами діаметром 1,58 м дорівнюють 85,6 °С та 97 °С. При цьому кінцевий вологовміст, що досягла м'ятка в кожному апараті є майже однаковим.

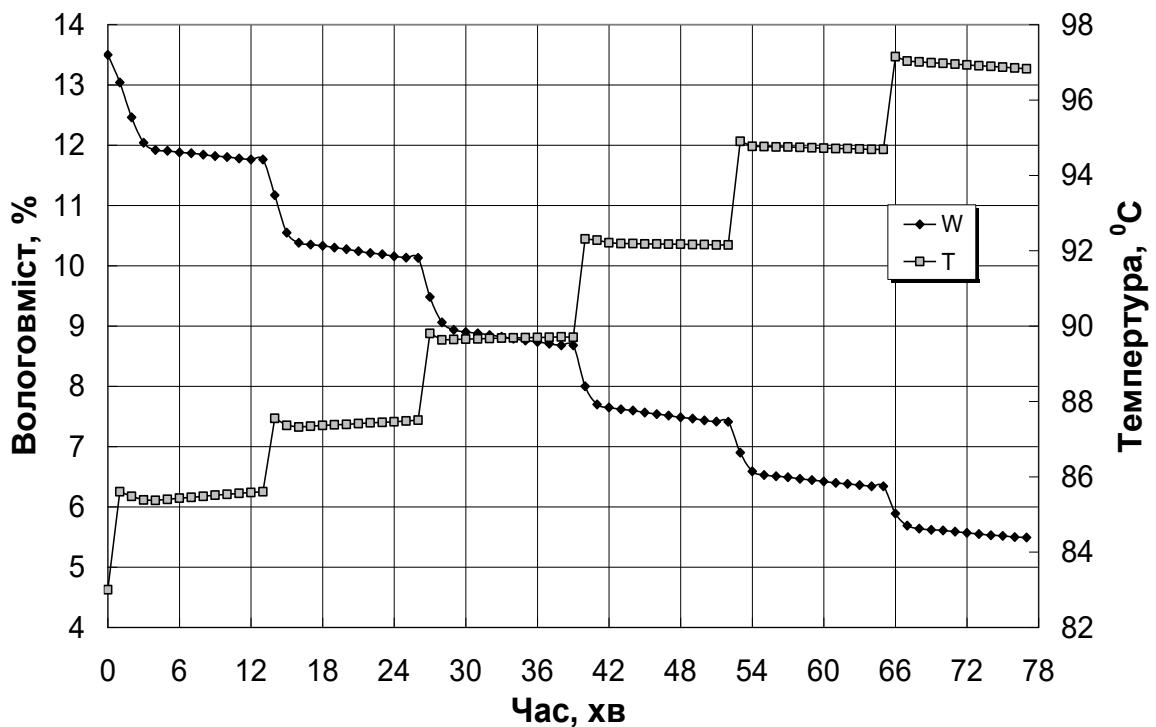


Рисунок 3.22 Зміна в часі середніх значень температури і вологовмісту м'ятки в процесі висушування в чанній жаровні для семи чанів

Відомо, що основним параметром, який дозволяє інтенсифікувати процес зневоднення вологої пористої системи є температура [134] теплоносія або теплообмінної поверхні.

Однак застосування цього заходу при організації процесу висушування олійно-вмісної сировини не є доцільним, оскільки температура частинок м'ятки, що контактують з гарячою бічною поверхнею чанів може істотно перевищувати гранично допустиму температуру 115 °С.

На рисунку 3.23 представлено зміну температури по товщині H шару м'ятки в межах бічної гріючої поверхні на початковій стадії пропарювання і зневоднення (2 чан) та на останньому етапі (7 чан) висушування в момент часу 12 хв. Як і для апарату з діаметром чанів 1 м (рис. 3.21), температура сировини в цих точках перевищує визначену для олійної сировини гранично допустиму температуру, тривалий вплив якої може призводити до втрати якісних показників олії.

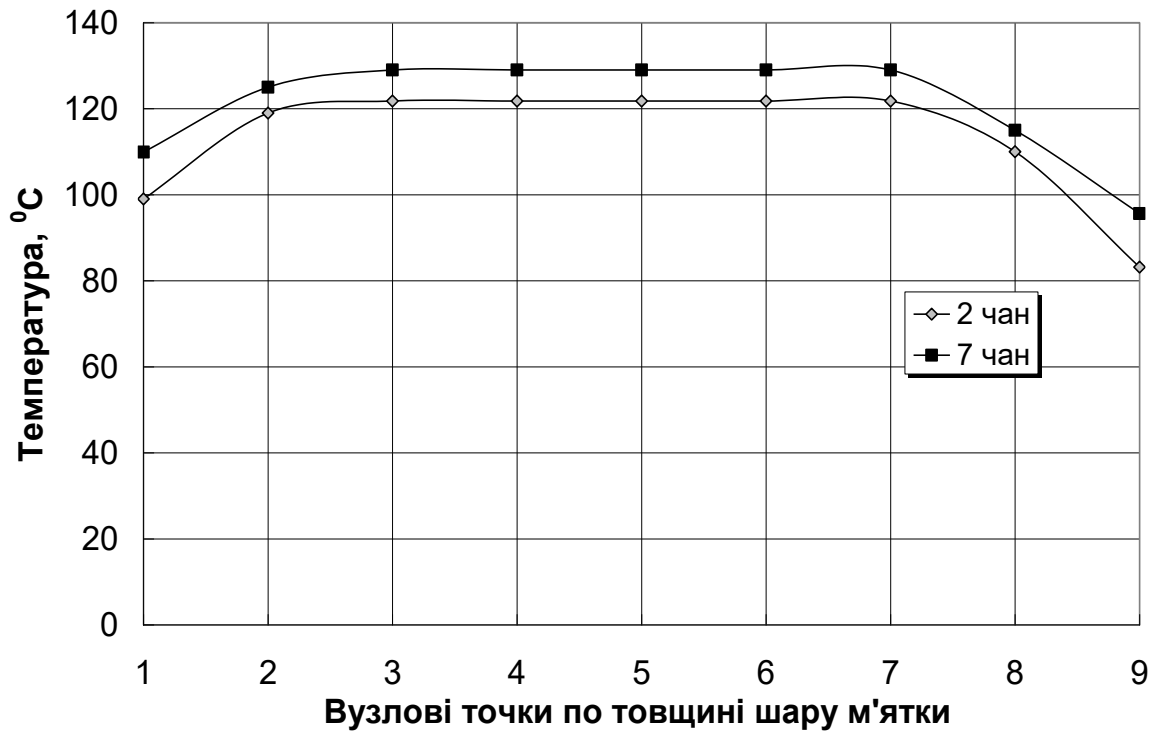


Рисунок 3.23. Зміна температури T м'ятки рицини по товщині шару в перерізі $r = R$, $0 \leq y \leq H$ у другому і сьомому чанах жаровні (діаметром 1,58 м) в процесі висушування у момент часу 12 хв

Однак слід зазначити, що рух дисперсного шару під дією турбінної мішалки при побудові математичної моделі враховувався не прямо, а через збільшення товщини і порозності шару. Є підстава вважати, що час контакту частинок з гріючими поверхнями буде таким, що не дозволить їм досягати температури вище гранично допустимої для даного виду сировини.

Розробка будь-якої промислової технології має загальноприйнятту схему: проведення досліджень процесів, якими ця технологія супроводжується (фізичне або математичне моделювання); апробація технології у промислових умовах; уточнення визначальних параметрів, на основі яких уточнюється математична модель або результати експериментальних досліджень, отриманих у лабораторних умовах.

3.2. Математичне моделювання процесів віджиму олії з олійної сировини у шнековому пресі

3.2.1 Фізика процесу пресування мезги

При дослідженні процесів вологотеплової обробки м'ятки і зміні режимів віджиму в гвинтових пресах використовувалися, нарівні з теорією переробки насіння олійних культур, методи і математичні моделі з інших галузей науки.

Мезгу насіння олійних культур слід віднести до багатофазової системи: «скелет» (гелева частина) мезги - порова рідина - рослинна олія і вода, а також парогазова складова. У механіці ґрунтів розроблена і широко застосовується теорія консолідації ґрунтів з одночасним урахуванням фільтраційних властивостей ґрунту і властивостей повзучості [2,3,5].

Термін «повзучість», як він зараз розуміється в механіці суцільних середовищ, не охоплює всього процесу деформування багатофазних середовищ. У зв'язку з цим кращим є термін «консолідація», під яким розуміється деформування багатофазного середовища в часі при постійному зовнішньому навантаженні. При цьому процес ущільнення відбувається як за рахунок поступового вичавлювання порової рідини, так і за рахунок одночасного протікання реологічних процесів у «скелеті» середовища.

Особливістю процесу віджиму рослинних олій в гвинтовому пресі, що відрізняє його від явищ, що розглядаються в класичних теоріях фільтрації і міграції, полягає в безперервному зменшенні пористості матеріалу.

Опис полів гідродинамічного тиску і швидкостей рідини (олії), що заповнює пори «скелета» мезги в робочому просторі зерної камери гвинтового преса вирішується тим, що розглядається процес консолідації [2,5].

При гвинтовому русі мезги по гвинтовому пресу одночасно протікають два фізичних процеса: пресування пористого «скелета» мезги і фільтрація олії через шар цього «скелета» і зер корпусу преса.

Процес пресування мезги і фільтрації олії через шар мезги відбуваються при відносному русі один до одного. Такий процес фільтрації в механіці ґрунтів описується залежністю Дарсі-Герсеванова [2,5].

3.2.2. Рух високов'язких матеріалів по гвинтовим траєкторіям

Перебіг мезги в гвинтових пресах можна уподібнити процесу гвинтової течії розплаву полімерів. Перебіг розплаву в зоні дозування відбувається під дією сил в'язкого тертя, що розвиваються внаслідок відносного руху черв'яка і стінок циліндра, подібно течії рідини в гвинтових насосах - по гвинтовій траєкторії [2]. Прийнято представляти цю течію як суму двох незалежних рухів: поступального руху вздовж осі гвинтового каналу, циркуляційного (кругового) руху в площині $хоу$ нормального до осі гвинтового каналу.

Об'ємна витрата поступальної течії визначає продуктивність преса. Циркуляційна течія виникає внаслідок існування складової швидкості відносного руху в напрямі, що перпендикулярний осі гвинтового каналу, що захоплює розплав в цьому напрямку.

Рухаючись упоперек каналу, потік зустрічає стінку, що виштовхується і прямує уздовж неї на дно каналу, а потім у зворотний бік. Циркуляційна течія забезпечує гомогенізацію розплаву, вирівнює розподіл температур і дозволяє використовувати екструзію для змішування.

Частина матеріалу, що знаходяться поруч зі стінкою, що не повертається назад, а проходить через кільцевий зазор, який існує між гребенем стінки гвинтового каналу і внутрішньою поверхнею корпусу. Це потік витоку.

Просуваючись в зоні дозування, полімер продовжує нагріватися як за рахунок підведення тепла ззовні, так і за рахунок тепла, що виділяється внаслідок інтенсивної деформації зсуву.

Математична модель зони дозування є результатом спільного рішення системи рівнянь, які виражають закони збереження маси, енергії і кількості руху при ламінарному плинні, з рівняннями, що описують фізичний стан рідини [6].

Найбільш послідовно модель гвинтового ізотермічного плинуньютонівської рідини була розглянута низкою американських авторів: Карлео, Маллука і Мак-Кельві [198], що поклали початок гідродинамічного підходу до опису процесу екструзії.

Використання спрощеної моделі дозволило розібратися в механізмі руху розплаву. Експериментальні дослідження Маддока, Екера [6] та інших показали, що якісна картина добре узгоджується з даними дослідів. Однак спроби застосування цієї моделі для цілей інженерного розрахунку виявилися безуспішними, оскільки при її побудові ігнорувалися основні особливості розплаву, такі як аномалія в'язкості, температурна залежність в'язкості, наявність процесу теплообміну.

Згодом задача при гвинтовому русі аномально-в'язкої рідини неодноразово розглядалася в ряді вітчизняних і зарубіжних робіт. Так, ізотермічна течія «ступеневої» рідини розглядалася в роботах Балашова, Торнера, Бостанджіяна, Морі, Глайда, Якобі, Крюгер, Кроссер, Мак-Келві [6] та інших авторів. Гвинтову течію бінгамової рідини розглянуто в роботах Столина і Бостанжяна, Тябіна, Де-Ховена та інших. Робилися також спроби побудови моделей течії еластичних рідин [6]. Однак ці роботи не дозволили моделювати реальний процес, оскільки в них не враховувалося існування теплообміну.

Для опису гвинтової течії розплаву широко застосовується метод зверненого руху [198]. Щоб задовільно описати процес екструзії, математична модель течії розплаву в межах зони дозування повинна враховувати основні особливості процесу: існування аномалії в'язкості; взаємний вплив циркуляційної і поступальної течій; вплив тепла, що виділяється в результаті в'язкого тертя, і теплообміну з навколишнім середовищем на температуру і ефективну в'язкість розплаву.

Приклад математичної моделі гвинтової течії ньютонівської рідини наведено Р.В. Торнером, який течію вважав сталою а масовими силами і силами інерції знехтував. З урахуванням цих припущень було визначено, що рівняння рівноваги в напругах зведуться до виду [2,5,198] :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} &= \frac{\partial p_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zx}}{\partial z}; \\ \frac{\partial P}{\partial y} &= \frac{\partial p_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial z}; \\ \frac{\partial P}{\partial z} &= \frac{\partial p_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial p_{xz}}{\partial x}. \end{aligned} \right\} \quad (3.70)$$

Середовище вважають нестисливим [2,5]:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (3.71)$$

В якості реологічного рівняння стану використовують узагальнений ступеневий закон [198] :

$$\eta_a = \mu_0 e^{-b(T-T_0)} \left(\frac{1}{2} I_2 \right)^{\frac{1-n}{2n}}, \quad (3.72)$$

де μ_0, n – константи матеріалу; b – температурний коефіцієнт в'язкості; I_2 – квадратичний інваріант тензору швидкостей деформації.

Таким чином, процес гвинтової течії розплаву полімерів в зоні дозування черв'яка екструдера і руху мезги насіння рицини в гвинтовому пресі мають наступні загальні риси: обидва переробляємих матеріала рухаються по гвинтовій лінії під тиском, при високій температурі, вони високов'язкі, розглядаються як ньютонівські рідини. На процес переміщення обох матеріалів роблять взаємний вплив циркуляційна і поступальна течії, тепло, що виділяється в результаті в'язкого тертя і теплообміну з навколишнім середовищем.

При розгляді пресування мезги в гвинтовому пресі ніхто не брав до уваги в математичній моделі високу температуру мезги і її приріст, в результаті в'язкого тертя, і вплив на ефективну в'язкість мезги. Однак, мезгу насіння рицини, на відміну від розплаву полімерів, слід розглядати як двофазну систему, що складається зі «скелета»

мезги і порової рідини у вигляді високов'язкої рицинової олії. При гвинтовому русі мезги по гвинтовому пресу одночасно протікають два фізичних процеси: пресування пористого «скелета» мезги і фільтрація олії через шар цього «скелета» і потім через зеєр корпусу преса.

3.2.3. Види тиску, що діють на робочі органи гвинтового преса

В роботах [38-47] проведено аналіз процесу пресування на прикладі одного витка гвинтового валу. Наведена методика може бути поширена на преси, що мають вали з декількома витками, на вали зі змінним перетином, а також на приймальний виток. В цьому випадку необхідно розбити всю пресуючу частину машини на ділянки між витками шнека і розглядати явище на кожній ділянці відповідно до наведеної нижче методики.

У пресованій масі існує дві системи тиску. За аналогією з механікою дисперсних тіл, першу систему називається нейтральним тиском, другу - ефективним, а суму - повним тиском. Нейтральний тиск H визначається напором фільтруємої олії; ефективний тиск P сприймається «скелетом» мезги.

У міру пресування мезги повний тиск зростає внаслідок опору фільтрації (завдяки звуженню міжчасткових каналів) і зростанню опору мезги стиску при зближенні її частинок. Як повний тиск, так і його складові - нейтральний і ефективний тиск, є функціями порозності мезги.

Нейтральний тиск H визначається опором, який сприймає олія, що фільтрується при проходженні по міжчастинковим каналам мезги і крізь щілини циліндра, і тому може бути представлений як сума двох напорів: напору фільтрації h и напору течії крізь зеєрні щілини q [198]:

$$H = (h + q)g\rho , \quad (3.73)$$

де ρ – щільність рідини в кг/м^3 ;

g – прискорення вільно падаючого тіла в м/с^2 .

Напір фільтрації олії визначається згідно із законом Дарсі, відповідно до якого витрата фільтруємої рідини в одиницю часу через елементарний поперечний переріз дисперсної речовини при її ламінарній течії дорівнює [6]:

$$v = kJ \frac{1 + \varepsilon}{\varepsilon}, \text{ м/с}, \quad (3.74)$$

де

$$J = \frac{h_2 - h_1}{L_1}, \quad (3.75)$$

J – гідравлічний градієнт - відношення різниці напорів до довжини шляху фільтрації;

k – коефіцієнт фільтрації;

$$v = \frac{V}{F} \text{ м/с}, \quad (3.76)$$

де V – витрата рідини, м³/с;

F – площа перетину в м²;

ε – коефіцієнт порозорості;

h_2 – максимальний напір олії, що піддається фільтрації;

h_1 – тиск середовища, в яке відбувається витікання.

Оскільки витікання олії з циліндра крізь зерні щілини відбувається при атмосферному тиску, то $h_1 = 0$. Тоді з рівнянь (3.73) та (3.75) слідує

$$h = h_2 = \frac{vL_1\varepsilon}{k(1 + \varepsilon)} \text{ м}, \quad (3.77)$$

Напір витікання олії крізь зерні щілини може бути визначено за загальними закономірностям гідравліки. Рівняння визначення нейтрального тиску може бути представлено в наступному вигляді [6]:

$$H = \left[\frac{vL_1\varepsilon}{k(1+\varepsilon)} + q \right] g\rho, \text{ н/м}^2, \quad (3.78)$$

З рівняння (3.78) можна зробити наступні висновки:

1. Швидкість витікання залежить від опору фільтрації і є функцією порозності речовини. Чим менше порозність, тим вище опір фільтрації, а так як порозність змінна, і зменшується у напрямку до діафрагми, то і швидкість витікання по довжині зерного циліндру падає у напрямку до діафрагми.

2. Чим більший шар мезги між зером і гвинтовим валом, тим більший шлях фільтрації L_1 та тим нижче швидкість течії олії при тому самому напорі.

Внаслідок безперервної зміни порозності і фізико-механічних властивостей мезги при її ущільненні, коефіцієнт фільтрації неоднаковий в різних перетинах пресованої мезги по довжині циліндра.

Коефіцієнт фільтрації k та гідравлічний градієнт J залежить не тільки від порозності рідини, але і від характеру підготовки мезги до пресування, що визначається рядом таких факторів, як, наприклад, температура, вологість тощо. Вивчення закономірностей впливу параметрів k та J повинні слугувати предметом спеціального дослідження.

Ефективний тиск P . Умовно можна вважати, що мезга в циліндрі преса розташовується у вигляді порожнього циліндра, підставами для цього служать передня поверхня витка шнека і діафрагма, які утворюють поверхні - внутрішня поверхня зерного циліндра і вал шнека. Оскільки шнековий вал обертається, то і кожний перетин цього циліндра, перпендикулярний до його осі, буде прагнути брати участь в двох рухах: поступальному - уздовж осі преса, від витка до діафрагми, і обертальному навколо осі.

Під ефективним тиском розуміємо той тиск, який діє від витка шнека у напрямку його осі і забезпечує ущільнення «скелета» мезги. Цей тиск врівноважується в

пресі силами тертя мезги об стінки зєрного циліндра, які утримують ножами і валом шнека, а також опором діафрагми.

В елементарному шарі діють наступні сили (рис. 3.24):

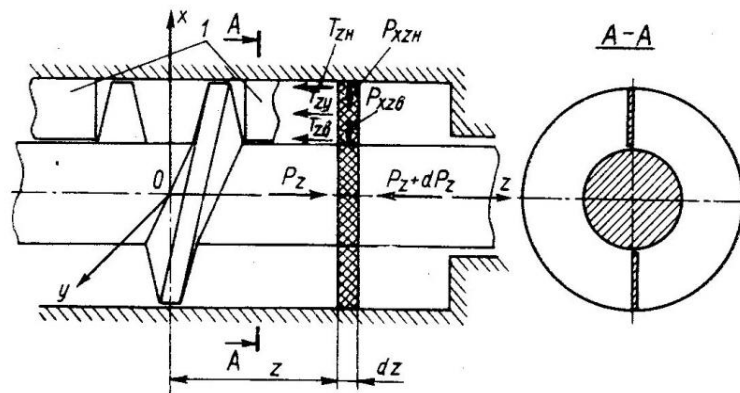


Рис 3.24. Схема осьових сил і сил бокового тиску, що діють в гвинтовому пресі [185]

1. нормальний тиск P_z и $(P_z + dP_z)$ відповідно на відстані z та $(z + dz)$ від витка шнеку;
2. боковий тиск P_{xz} – по зовнішній поверхні шару мезги P_{xzH} , по її внутрішній поверхні P_{xzB} , по поверхні ножів P_{xzy} ;
3. сили тертя по зовнішній поверхні слою T_{zH} (по внутрішній порожнині зєрного циліндра) і по внутрішній його поверхні T_{zB} (по валу шнека);
4. сили тертя про утримуючі ножи T_{zy} .

Для елементарного шару приймаємо наступні умови:

$$P_{xzH} = P_{xzB} = P_{xzy} = P_{xz},$$

тоді:

$$T_{zH} = P_{xz} f_{gH}; \quad (3.79)$$

$$T_{zB} = P_{xz} f_{gB}, \quad (3.80)$$

$$T_{zy} = P_{xz} f_{gy}, \quad (3.81)$$

де f_{gH} – коефіцієнт тертя мезги о внутрішню поверхню циліндра пресу;

f_{gB} – коефіцієнт тертя мезги о вал шнека;

f_{gy} – коефіцієнт тертя мезги що утримують ножі.

В механіці дисперсних тіл встановлено, що діючи в елементарному шарі нормальний тиск P_z пов'язаний з величиною бокового тиску P_{xz} наступною залежністю:

$$\frac{P_{xz}}{P_z} = \xi, \quad (3.82)$$

де ξ – коефіцієнт бокового тиску.

Проектуючи всі сили на ось z та використовуючи рівняння (3.79), (3.80), (3.81), одержимо:

$$F dP_z = -\left(f_{gH} P_{xz} S_H dz + f_{gB} P_{xz} S_B dz + f_{gy} P_{xz} S_y dz\right), \quad (3.83)$$

де $F = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$ – площа поперечного перетину виділеного шару в м²;

$S_H = \pi D$ – периметр шару по внутрішній порожнині зєрного циліндра в м;

$S_B = \pi d$ – периметр шару по валу шнека в м;

S_y – периметр утримувальних ножей в м;

dz – довжина елементарного шару в м;

D – внутрішній діаметр зєрного циліндру в м;

d – діаметр валу шнека в м.

Підставляючи в рівняння (3.83) значення вхідних в нього величин, одержимо:

$$\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} dP_z = -\xi P_z \pi \left(f_{gh} D + f_{gb} d + f_{gy} \frac{S_y}{\pi} \right) dz, \quad (3.84)$$

$$\frac{dP_z}{P_z} = -\frac{4\xi \left(f_{gh} D + f_{gb} d + f_{gy} \frac{S_y}{\pi} \right) dz}{D^2 - d^2}, \quad (3.85)$$

При протіканні реального процесу значення величин коефіцієнтів тертя і бокового тиску не є постійними і в значній мірі залежать від ступеня ущільнення мережі, її фізико-механічних властивостей, що створює тиск і ряд інших чинників.

У зв'язку з цим значення цих величин будуть відрізнятися в різних площинах по довжині циліндра.

Як показують проведені експериментальні дослідження, коефіцієнти тертя f в процесі пресування змінюється несуттєво. Що стосується коефіцієнтів бокового тиску ξ , то в першому приближенні можна прийняти боковий тиск P_x пропорціонально вісьовому P_z . У зв'язку з цим при інтегруванні f та ξ приймаємо постійними.

Інтегруя приведені вище рівняння, одержимо:

$$\int \frac{dP_z}{P_z} = -\int \frac{4\xi \left(f_{gh} D + f_{gb} d + f_{gy} \frac{S_y}{\pi} \right)}{D^2 - d^2} dz + c_1, \quad (3.86)$$

Вводимо позначення

$$c = \frac{4\xi \left(f_{gh} D + f_{gb} d + f_{gy} \frac{S_y}{\pi} \right)}{D^2 - d^2}, \quad (3.87)$$

Проводячи інтегрування, одержимо $\ln P_z = -cz + c_1$, при $z = 0$ $P_z = P$.

Тоді $c_1 = \ln P$, $\ln P_z = -cz + \ln P$, звідки:

$$\ln \frac{P_z}{P} = -cz, \quad (3.88)$$

$$P_z = P e^{-cz}, \quad \text{н/м}^2 \quad (3.89)$$

Рівняння (3.89) є рівняння розподілу пресуючих тисків на розглянутій ділянці по довжині зерного циліндра. Тиск від ущільнення «скелета» мезги у діафрагми (тобто у вихідного отвору) можна отримати підставивши в рівняння (3.) $z = L$, де L – довжина зерного циліндру (в м) від витка шнеку до діафрагми:

$$P_{z=L} = P_d = P e^{-cL}, \quad \text{н/м}^2, \quad (3.90)$$

Величина P , що входить у рівняння, та є необхідним нам ефективним тиском, діючі на виток шнеку:

$$P = P_d e^{cL}, \quad \text{н/м}^2, \quad (3.91)$$

$$P_z = P_d e^{c(L-z)}, \quad \text{н/м}^2, \quad (3.92)$$

З рівняння (3.89) видно, що характер розподілу пресуючих тисків по довжині зерного циліндра виражається логарифмічною залежністю. При розрахунку тисків по рівняннях (3.89) – (3.92) результат буде тим точніше, чим ближче будуть значення величин, що входять в рівняння коефіцієнтів, до усереднених їх значень по довжині циліндра.

Боковий тиск. Використовуючи рівняння (3.84) і (3.89), рівняння залежності бокового тиску від ефективного тиску в кожній точці зерного циліндра по його довжині можна представити в наступному вигляді [6]:

$$P_{xz} = \xi P e^{-cz} \quad \text{н/м}^2 \quad (3.93)$$

Повний боковий тиск на стінки зерного циліндра [185,187]:

$$Q_{xz} = P_{xz} + H, \quad \text{н/м}^2, \quad (3.94)$$

$$Q_{xz} = \xi P e^{-cz} + H, \quad \text{н/м}^2. \quad (3.95)$$

Повний питомий тиск пресування. Повний питомий тиск на робочу (пресуючу) грань витка преса визначається сумою двох тисків - нейтрального і ефективного [186,187]:

$$Q = H + P, \quad (3.96)$$

Підставляючи значення з рівняння (3.78) і з рівняння (3.91) в рівняння (3.96), отримаємо: [6]

$$Q = g\rho \left[\frac{\nu L_1 \varepsilon}{k(1 + \varepsilon)} + q \right] + P_d e^{cL}, \quad \text{н/м}^2 \quad (3.97)$$

З рівняння (3.97) випливає, що залежність між збільшенням опору діафрагми, яке визначається величиною розкриття щілини для виходу макухи, і збільшенням тиску пресування нелінійна. Зазначене положення підтверджується практичною роботою.

В.В. Белобородов, аналізуючи наведене рівняння (3.97), ввів наступне доповнення. Так як $P_z = Pe^{-cz}$ та $P_{xz} = \xi Pe^{-cz}$ (при $z = 0$, $P_z = P$ – див. (3.89) і (3.83)), з трикутника розкладання тисків на тверду фазу рівнодіючий P_T визначається в наступному вигляді [193]:

$$P_T = \sqrt{P_z^2 + P_{xz}^2} = Pe^{-cz} \sqrt{1 + \xi^2}, \quad (3.98)$$

Загальний тиск на виток шнека при цьому приймає вигляд [193]:

$$Q = g\rho \left[\frac{\nu L_1 \varepsilon}{k(1 + \varepsilon)} + q \right] + Pe^{-cz} \sqrt{1 + \xi^2}, \quad (3.99)$$

В роботі [198] стверджують, що в пресованій мезгі має місце дві системи тиску. За аналогією з механікою дисперсних тіл тиск, що впливає на порову рідину (олію) називають нейтральним тиском. Тиск, сприймається «скелетом» мезги, називають ефективним тиском. Однак коли розглядають схему діючих в елементарному шарі мезги сил, то не враховують гідродинамічний (нейтральний) тиск в олії, який створюється теж за рахунок впливу шнека на мезгу. В теорії консолідації ґрунтів [186 – 188] також приймаються дві системи тиску, які одночасно діють на тіло, що стискається. Розробка теорії про розподіл для будь-якого моменту часу тиску в поровій рідині є основним завданням теорії консолідації. У процесі стиснення кожна зі складових тисків може змінюватися за величиною. В теорії консолідації, на відміну механіки суцільних середовищ, процес фільтрації розглядається в умовах безперервного зменшення пористості матеріалу.

Напір фільтрації олії визначають за законом Дарсі. У разі процесу пресування мезги і фільтрації олії через шар переміщення мезги по поверхні гвинтового валу «скелет» мезги деформується і, отже, знаходиться в русі щодо порової рідини. Процес фільтрації для такого випадку описується залежністю Дарсі-Герсеванова.

3.2.4. Закономірності процесів обробки мезги в гвинтовому пресі

Ступінь стиснення мезги в гвинтовому пресі

Ступінь стиснення – це відношення початкового об'єму мезги до кінцевого об'єму, зумовленого певним тиском. Відомо, що мезга в гвинтовому пресі знаходиться у вільному об'ємі витка, який безперервно зменшується, чим і створюється тиск на мезгу.

Стосовно гвинтового пресу ступінь стиснення мезги в ньому – це відношення вільного об'єму попереднього витка до вільного об'єму наступного. Для пресів ФП і ЛЦ розрахована ступінь стиснення, що наведені в (табл. 3.19.).

Таблиця 3.19.

Ступінь стиснення у пресів ФП і ЛЦ [7]

Тип пресу	Номер витка									Кінцева втулка
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
ФП	1	1,26	1,70	3,90	5,40	6,48	8,04	10,8	–	13
ЛЦ	1	–1,26	–1,25	2,24	3,27	5,01	7,10	11,3	9,6	–

Характер зміни вільного об'єму витоків за довжиною гвинтового вала характеризує правильність його конструкції і правильність розмірів витків і зерного барабана, тобто характеризує вал з якісної сторони. Ступінь стиснення мезги, створена шнеком, характеризує її з кількісної сторони.

Якщо для пресів різних типів зіставити зміни вільного об'єму вала, то відразу виявиться різниця, як в конструкції, так і в якості вала. Зрозуміло, що найкращою конструкцією гвинтового вала буде та, у якій зміна вільного об'єму буде найбільш плавною.

Мезга, що надходить, має велику кількість міжчасткових пустот, які для скорочення зовнішньої поверхні мезги повинні бути якомога скоріше ліквідовані. Тому очевидно, що для створення хоча б невеликого тиску на мезгу вільний обсяг витка повинен різко зменшитися. На наступних витках вільний об'єм повинен змінюватися менш інтенсивно, так як після ліквідації міжчасткових пустот внутрішня поверхня

зменшується за рахунок стиснення капілярів гелевою частини, об'єм якої відносно малий.

Вищевказаним міркуванням більш повно відповідає зміна вільного об'єму витоків гвинтового валу преса ФП.

Зміна вільного об'єму витоків підпорядковується деякій закономірності, тому між вільним об'ємом витка і його порядковим номером на гвинтовому валу повинна бути цілком певна закономірність. Така закономірність була встановлена для преса ФП [6, 199-215], який володіє найкращою конструкцією гвинтового валу, у вигляді рівняння:

$$V_{c.o} = \frac{7,78}{n_o^{1,145}}, \quad (3.100)$$

де $V_{c.o}$ – вільний об'єм витка;

n_o – порядковий номер витка на гвинтовому валу.

Отримана залежність дозволяє розрахувати, скільки витків повинно бути на гвинтовому валу для створення певної міри стиснення, або ж знайти об'єм кожного витка на гвинтовому валу.

Ступінь стиснення мезги, що отримується поділом вільного об'єму першого витка на вільний об'єм останнього витка, характеризує в деякій мірі шнековий вал. Однак ця ступінь не є ступенем стиснення мезги в пресі. Після останнього витка є предконусна камера, де вільний об'єм так само зменшується. Крім того, після предконусної камери є регулювальний пристрій тієї чи іншої конструкції, який створює протитиск, що також викликає стиснення мезги.

Отже, теоретичну ступінь стиснення мезги в пресі $\varepsilon_{\text{пр}}^T$ можна уявити як ступінь стиснення мезги, створювану шнековим валом $\varepsilon_{\text{ш.в.}}$, помножену на коефіцієнт, величина якого залежить від положення регулювального пристрою. Для визначення практичного ступеня стиснення мезги в пресі ФП отримано кінцеве рівняння [190]:

$$\varepsilon_{np}^{np} = 0,97 \left[\varepsilon_{np}^T - (21,8 - 1,16\delta) \right], \quad (3.101)$$

де теоретична ступінь стиснення мезги в пресі:

$$\varepsilon_{np}^T = \frac{10,2\varepsilon_{ш.в.}}{\delta^{0,85}}, \quad (3.102)$$

$\varepsilon_{ш.в.}$ – ступінь стиснення, що створена шнековим валом;

δ – ширина вихідної щілини (мм), при якій працює прес.

Розподіл тиску вздовж гвинтового валу

Зміна теоретичного ступеня стиснення мезги уздовж гвинтового вала було розглянуто раніше. Однак через наявність коефіцієнта повернення дійсний ступінь стиснення на витках буде інший [198]. Для визначення дійсного ступеня стиснення мезги на витках можна виходити з таких передумов.

Теоретична ступінь стиснення мезги в пресі може бути визначена за формулою (3.102), а практична за емпіричною формулою (3.101).

Так як справжня і теоретична ступінь стиснення мезги на першому витку становить 1, то відношення цих ступенів стиснення мезги на конусі преса визначається, як:

$$\nu = \frac{\varepsilon_{np}^T - 1}{\varepsilon_{np}^{np} - 1}, \quad (3.103)$$

Слід згадати, що таке співвідношення між дійсною і теоретичною ступенями стиснення буде і на пресуючих витках. Тоді з формули (1.34) отримаємо:

$$\varepsilon_{\varepsilon}^{np} = 1 + \frac{\varepsilon_{\varepsilon}^T - 1}{\nu}, \quad (3.104)$$

де $\varepsilon_{\varepsilon}^{np}$ та $\varepsilon_{\varepsilon}^T$ – практична і теоретична ступінь стиснення мезги на витку;

ν – відношення теоретичної до практичного ступеня стиснення мезги на

конусі преса при робочій ширині вихідної щілини.

У форпрес олія віджимається при тиску, що не перевищує 5,0 МПа, хоча тиск на конусі може досягти більшого значення.

Розрахунки показали, що ступінь стиснення в витках гвинтового вала преса ФП по вільному об'єму витків змінюється від 1 до 10,8. Практична ступінь стиснення мезги на витках при ширині вихідної щілини 6 мм змінюється від 1,42 до 8,9; при ширині щілини 8 мм від 1,21 до 6,11 і при щілини 12 мм від 1 до 5,29.

За формулою (3.103) можна визначити дійсний ступінь стиснення на кожному витку, і, отже, можна знайти тиск на ньому. Крім того, за допомогою цього співвідношення можна встановити вплив положення регулювального пристрою на розподіл тиску по довжині гвинтового вала.

На рис.3.25. наведено приклад розподілу тиску по довжині гвинтового вала. Тут видно, що при переході мезги з витка на виток тиск по довжині гвинтового вала плавно зростає, і так триває до останнього витка (до предконусної камери). У предконусній камері тиск може різко збільшуватися, що буде залежати від положення регулювального пристрою.

При зменшенні ширини вхідної щілини (при конусі) тиск в конусі сильно зростає, в той час як тиск на останньому витку зростає незначно.

Таке співвідношення тисків цілком закономірно, так як великий тиск, що виникає на конусі, має на останній виток передаватися по мезгі. Однак мезга є пластичним тілом, тому градієнт тиску в ній дуже великий; отже, тиск по довжині предконусної камери різко зменшується. Крім того, якщо тиску буде піддаватися останній виток, то воно буде сприйматися передньою площиною нитки витка, яка буде перешкоджати розподілу тиску далі по довжині гвинтового вала. Виконані розрахунки повністю підтверджують це.

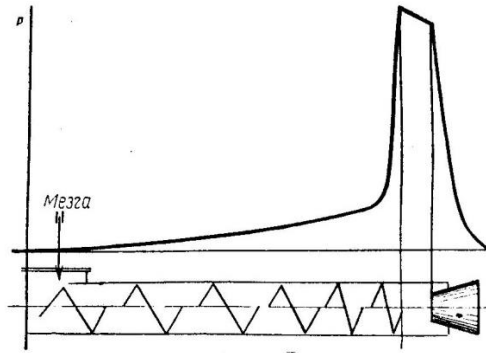


Рис. 3.25. Схема зміни тиску по довжині гвинтового вала [254]

3.2.5. Сили, які діють в розгорнутому каналі шнека

В роботах [38-47] проведено аналіз процесу пресування на прикладі одного витка гвинтового вала. Наведена методика може бути поширена на преси, що мають вали з декількома витками, на вали зі змінним перетином, а також на приймальний виток. В цьому випадку необхідно розбити всю пресуючу частину машини на ділянки між витками шнека і розглядати явище на кожній ділянці відповідно до наведеної нижче методики.

На рис. 3.26. представлена схема гвинтового преса з двозахідними витками. Хоча в гвинтових пресах в основному застосовуються однозахідні витки, рівняння, що описують процес пресування, виводяться в самій загальній формі, яка застосовується до шнеків при будь-якому числі заходів [38]. Для опису руху мезги в робочому каналі гвинтового преса доцільно застосувати метод зверненого руху. Очевидно, що для роботи гвинтового преса байдуже, чи обертається шнековий вал всередині нерухомого зеєра або навпаки, зеєр обертається навколо нерухомого гвинтового вала.

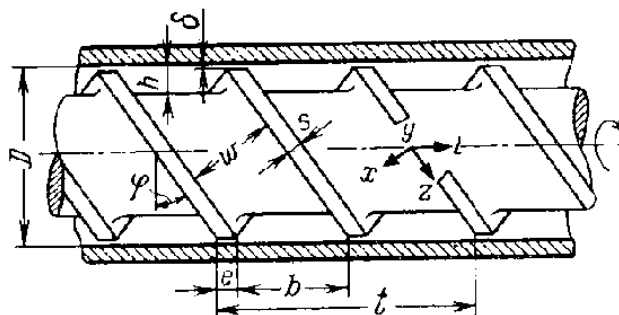


Рис. 3.26. Схема гвинтового преса [254]

З цієї причини для спрощення будемо вважати зєєр обертовим, а шнековий вал нерухомим [38-47, 198]. Розташування пов'язаної з шнековим валом нерухомої системи координатних осей x, y, z і допоміжної осі l показано на рис.3.27. вісь z орієнтована уздовж осі гвинтового каналу гвинтового вала, вісь l – уздовж осі гвинтового вала. При цьому корпус буде зображуватися нескінченною площиною, що рухається над розгорнутими каналами в перпендикулярному до осі l напрямку.

Окружна швидкість корпусу V_c можна розкласти на дві взаємно перпендикулярні компоненти V_z та V_x , відповідно спрямовані вздовж і впоперек каналу черв'яка.

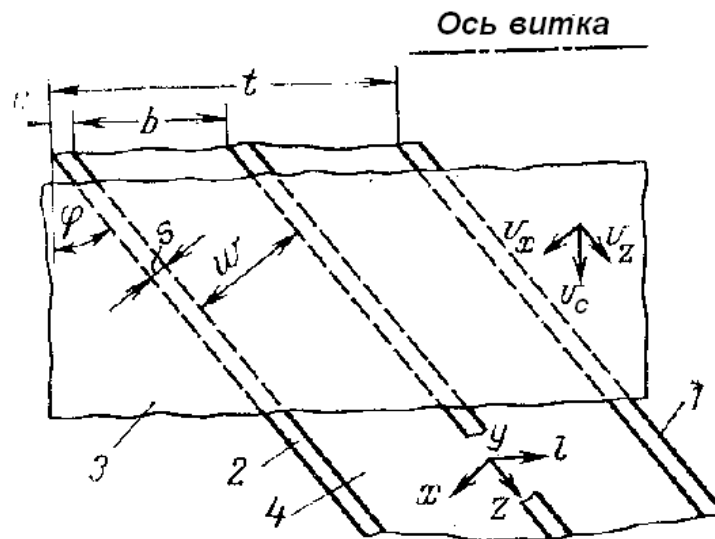


Рис. 3.27. Розгортка гвинтового каналу гвинтового преса на площині [196,254]:
1 – стінка каналу; 2 – розгортка витка; 3 – поверхня корпусу; 4 – канал

Аналогічно, швидкість рідини в будь-якій точці каналу характеризується відповідною величиною взаємно перпендикулярних компонент v_z та v_x . Існування швидкості поперечної течії v_x і одночасне дотримання умови нерозривності течії призводить до виникнення в каналі течії рідини в напрямку осі y зі швидкості v_y .

Величина цієї швидкості особливо значна у передній і задній стінках каналу, у яких рідина, що тече в поперечному напрямку, змінює напрямок течії. При ізотерміч-

ному ламінарному режимі в каналі постійного поперечного перерізу зважаючи на малість величини відношення глибини каналу h до його ширини можна припустити, що швидкість в напрямку каналу v_z є функцією координат x та y . В той час як v_x – функція тільки координати y .

На рис. 3.28. приведена схема поперечного перерізу каналу, де граничні умови представлені особливо наочно.

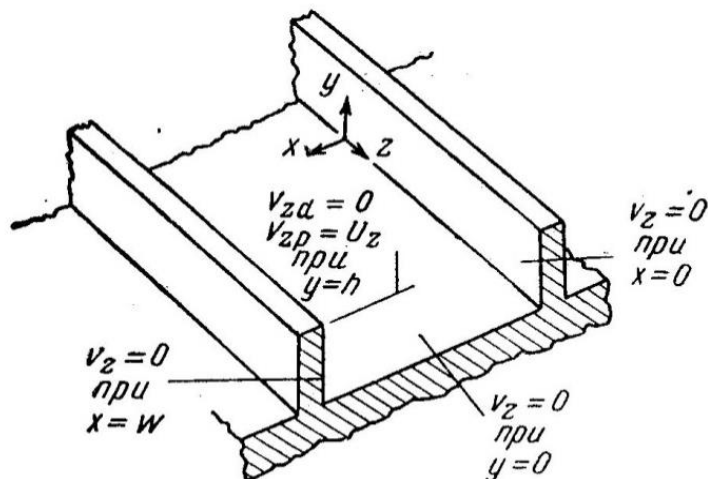


Рис. 3.28. Схема поперечного перетину каналу [196]

На рис. 3.27. представлений розгорнутий канал з напрямком сил, що діють на витки шнека. Нитка витків нахилена під кутом α до торця витка. Тому, питомий тиск при стисненні мезги, що діє по осі розгорнутого каналу [6, 198]:

$$p = \frac{2.52b\varepsilon^{5.5}}{e^{0.022w}}, \quad (3.105)$$

При стисненні тіла в замкнутому просторі силою, нормально спрямованою до поверхні, тіла що стискається, в нашому випадку по осі, буде створюватися також радіальний тиск [196]:

$$p_r = kp_H, \quad (3.106)$$

Питомий тиск по осі x зі сторони мезги на бокову поверхню розгорнутого каналу [5,198]:

$$p_x = 0.428 p \cos \beta, \quad (3.107)$$

Для мезги було прийнято середнє значення коефіцієнта Пуассона що дорівнює 0,3, тоді коефіцієнт бокового тиску [5,198]:

$$\xi = \frac{0,3}{1 - 0,3} = 0,428., \quad (3.108)$$

Згідно рис. 3.28, вектор тиску стиснення мезги по осі розгорнутого каналу дорівнює сумарному вектору тисків, нормально спрямований до поверхні передньої грані нитки [5,198]:

3

$$p = P_\Sigma \cos \beta, \quad (3.109)$$

В даному випадку вихідним вектором є вектор p , тоді сумарний вектор [5,196]:

$$P_\Sigma = \frac{p}{\cos \beta}, \quad (3.110)$$

Радіальний тиск, направлений від вала до внутрішньої поверхні зєрного барабана [5,198]:

$$p_4 = P_\Sigma \sin \beta = p \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (3.111)$$

Отже, повний питомий радіальний тиск [5,196]:

$$p_r = p_4 + p_r' = p(\operatorname{tg} \beta + 0.428), \quad (3.112)$$

Розглянуто сили, що діють в розгорнутому каналі витка.

1). Сила стиснення мезги [198]:

$$P_{\text{сж}} = p \cdot F_{\text{сеч}} = \frac{1}{4} p(a+b)(D-d), \quad (3.113)$$

Визначено довжину розгорнутого каналу по зовнішньому діаметру шнека D . При повному кроці витка t довжина розгорнутого каналу дорівнює гіпотенузі прямокутного трикутника з катетами рівними по довжині кола πD та величині кроку t [5,198]:

$$L_{\text{пол.}} = \sqrt{(\pi D)^2 + t^2}, \quad (3.114)$$

А з урахуванням того, що крок нитки витка більше його довжини:

$$L_{\text{н.пол.}} = L_{\text{пол.}} \cdot l/t, \quad (3.115)$$

де t – крок витка, l – довжина витка, a та b – відповідно нижня і верхня ширина розгорнутого каналу витка.

Аналогічно визначається довжина розгорнутого каналу по малому та середньому діаметрам витка преса.

2). Радіальна сила, спрямована від вала до внутрішньої поверхні зерного барабана, притискає мезгу до цієї поверхні [5,198]:

$$P_{r.з} = p_r \cdot F_з = p(\text{tg} \beta + 0.428) \cdot a \cdot L_{\text{н.пол.}} \quad (3.116)$$

де a – ширина робочої (внутрішньої) частини зерного циліндра в розгорнутому каналі.

3). Радіальна сила з боку мезги на днище розгорнутого каналу [5,196]

$$P_{r.д.} = p_r F_в = p(\text{tg} \beta + 0.428) \cdot b \cdot l_{\text{н.пол.}}, \quad (3.117)$$

де b – ширина днища в розгорнутому каналі.

$$l_{\text{пол}} = \sqrt{(\pi d)^2 + t^2}, \quad (3.118)$$

$$l_{\text{пол}} = \sqrt{(\pi d)^2 + t^2}, \quad (3.119)$$

$$l_{\text{н.пол.}} = l_{\text{пол}} \cdot l/t, \quad (3.120)$$

4). Сила тиску на стінку розгорнутого каналу по осі x [5,196]:

$$P_x = p_x F_{\sigma}, \quad (3.121)$$

де

$$F_{\sigma} = c \cdot l_{\text{н.пол.ср.}} = \frac{D-d}{2 \cos \beta} l_{\text{пол.ср.}} \cdot l/t, \quad (3.122)$$

$$c = \frac{h}{\cos \beta} = \frac{D-d}{2 \cos \beta}, \quad (3.123)$$

$$l_{\text{пол.ср.}} = \sqrt{(\pi d_{\text{ср.}})^2 + t^2}, \quad (3.124)$$

де F_{σ} – площа бокової стінки розгорнутого каналу;

c – висота бокової стінки розгорнутого каналу;

$l_{\text{пол.ср.}}$ – повна довжина бокової стінки розгорнутого каналу по середній лінії;

$l_{\text{пол.ср.}} \cdot l/t$ – довжина бокової стінки розгорнутого каналу з урахуванням того,

що крок нитки більше довжини витка.

Сили тертя в розгорнутому каналі, що виникають при русі мезги

1) Сила тертя на днище розгорнутого каналу [5,19]:

$$T_{д.} = f_1 P_{r.д.} = f_1 p_r F_B = f_1 p (tg\beta + 0.428) \cdot b \cdot l_{н.пол.} \quad (3.125)$$

2) Сила тертя на бічну поверхню розгорнутого каналу [196]

$$T = 2 \cdot f_1 P_x = 2 \cdot f_1 p_x F_{\sigma} = 2 \cdot f_1 0.428 p \cos\beta \cdot \frac{D-d}{2 \cos\beta} l_{пол.ср.} \cdot l/t. \quad (3.126)$$

3) Сила тертя на робочу поверхню зєєра [196]:

$$T_{r.з} = f_2 P_{r.з} = f_2 p_r \cdot F_3 = f_2 p (tg\beta + 0.428) \cdot a \cdot L_{н.полн.} \quad (3.127)$$

де f_1 – коефіцієнт тертя мезги на внутрішню порожнину розгорнутого каналу;
 f_2 – коефіцієнт тертя мезги на внутрішню порожнину зєєра.

Складено рівняння руху мезги по розгорнутому каналу з урахуванням сил тертя, опору стисненню «скелета» мезги, нейтрального тиску і протитиску на виході.

Спроектувавши всі сили на вісь z розгорнутого каналу всіх витків гвинтового вала і прирівнюючи результуючу суму до перепаду тиску в голівці (пристрої для регулювання товщини ракушки), отримано [196]:

$$\sum_1^n (P_{сжі} + T_{ді} + T_{\sigma i} + T_{rзі}) = \Delta p_{Г} \quad (3.128)$$

де n – число витків;

$\Delta p_{Г}$ – перепад тиску в голівці (пристрій для регулювання товщини ракушки).

Підставивши у вираз (3.128) значення вхідних величин отримано [196]:

$$\sum_1^n (p F_i + p \cdot A_{ді} + p A_{\sigma i} + p A_{rзі}) = \Delta p_{Г} \quad (3.129)$$

де

$$A_{\text{ді.}} = f_1 (\operatorname{tg} \beta + 0.428) \cdot b \cdot l_{\text{н.пол.}}; \quad (3.130)$$

$$A_{\text{бі}} = f_1 0.428 \cos \beta \cdot \frac{D-d}{2 \cos \beta} l_{\text{пол.ср.}} \cdot l/t. \quad (3.131)$$

$$A_{\text{г.з}} = f_2 (\operatorname{tg} \beta + 0.428) \cdot a \cdot L_{\text{н.полн.}}. \quad (3.132)$$

Перепад тиску в голівці при відомих значеннях продуктивності і коефіцієнті геометричної форми головки K визначають за формулою [197]

$$\Delta p_{\text{г}} = \frac{Q \mu_e}{K}, \quad (3.133)$$

де Q – продуктивність, $\text{см}^3/\text{с}$;

μ_e – ефективна в'язкість, $\text{кг} \cdot \text{с}/\text{см}^2$

K – коефіцієнт геометричної форми головки, см^3 .

Формули, засновані на спрощеному аналітичному методі розрахунку коефіцієнтів геометричної форми, дозволяють визначити характеристики каналів найпростіших форм з достатньою для практичних розрахунків точністю [198,199].

Кільцевий канал:

$$K_o = \frac{\pi}{8L} \left[R_{\text{н}}^4 - R_{\text{в}}^4 - \frac{(R_{\text{н}}^2 - R_{\text{в}}^2)^2}{\ln \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{в}}}} \right] \text{см}^3, \quad (3.134)$$

де $R_{\text{н}}$ – зовнішній радіус кільцевого каналу, см ;

$R_{\text{в}}$ – внутрішній радіус кільцевого каналу, см ;

L – довжина кільцевого каналу, см .

Конічний кільцевий канал з конічною щілиною [198,199]:

$$K_{\delta} = \frac{\pi(R_o\delta_2 - R_1\delta_1)}{6Lm}, \quad (3.135)$$

де m – коефіцієнт визначається по формулі

$$m = \frac{(R_o - R_1)^2}{(R_o\delta_2 - R_1\delta_1)^2} \ln \frac{R_o\delta_2}{R_1\delta_1} - \frac{(R_o - R_1)(\delta_1 - \delta_2)}{(R_o\delta_2 - R_1\delta_1)\delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2\delta_1^2\delta_2^2}, \quad (3.136)$$

де R_1 – середній радіус кола на виході матеріалу з кільцевої щілини, см;

R_o – середній радіус кола на вході матеріалу в кільцеву щілину, см;

δ_1 – висота щілини на вході матеріалу в кільцеву щілину, см;

δ_2 – висота щілини на виході матеріалу з кільцевої щілини, см;

L – довжина конічного кільцевого каналу з конічною щілиною, см.

Таким чином, використовуючи метод зверненого руху мезги в розгорнутому каналі окремого шнека, ми маємо можливість спростити гідродинаміку руху мезги в пресуючій частині шнека замінивши їх окремими ділянками.

3.2.6. Математична модель процесу консолідації при виділенні олії в гвинтовому пресі

Математична модель процесу заснована на теорії тривимірної консолідації оброблюваної сировини з урахуванням реологічних властивостей «скелета» мезги. При цьому можна вважати, що повзучість «скелета» мезги і фільтраційний рух олії відбуваються одночасно. Потрібно знайти раціональний закон консолідації в кожному шнечку і кількість шнечків на валу преса і вимоги до підготовки мезги при вологотепловій обробці м'ятки. При розрахунку якісні показники олії і макухи забезпечуються

обмеженням поєднання максимальної температури і вологості оброблюваної сировини[2,3,5].

Наближений підбір параметрів результатів експериментальних досліджень В.А. Маслікова [201] в Curve Fitting Toolbox (MATLAB) дозволили уточнити залежність питомого тиску від ступеня стиснення при різній температурі і вологості соняшникової мезги. Отримані залежності описуються експонентними функціями з довірчою ймовірністю 95% і кореляційними відносинами $\eta_{y/x} = 0,999$:

$$p = a_1 \exp\left(-\left((\varepsilon_v - b_1)/c_1\right)^2\right). \quad (3.135)$$

Параметри експериментальних функцій залежності питомого тиску від ступеня стиснення представлені в табл. 3.20.

Таблиця 3.20

Параметри експериментальних функцій залежності питомого тиску від ступеня стиснення мезги [253]

Вологість мезги, W, %	Параметри функцій			Вологість мезги W, %	Параметри функцій		
	a_1	b_1	c_1		a_1	b_1	c_1
6,55	137,00	6,010	0,371	0,945	137,00	3,590	0,258
1,80	137,00	4,010	0,278	0,22	137,00	3,490	0,269

Рівнянням (3.136) можна перевірити припущення про вплив температури жаріння на пружні властивості мезги. Так при вологості 4.0% і ступені стиснення 5,0 отримаємо: для температури 80⁰С питомий тиск $p=114,5$ кг/см²; для 90⁰С $p=130$ кг/см²; для 100⁰С $p=81$ кг/см². Зі зростанням температури жаріння з 80⁰С до 90⁰С пружні властивості мезги ростуть, з підвищенням температури жаріння з 90⁰С до 100⁰С ростуть пластичні властивості. Недостатньо високі пружні властивості мезги, вижареної при 80⁰С, пояснюються неповною денатурацією білкової частини мезги. Підвищена ж пластичність мезги, вижареної при 100⁰С, пояснюється частковим плавленням найпростіших білків білкового комплексу мезги. Мезга ж, вижарена при

90⁰С, має найбільш повну денатурацію білків без плавлення найпростіших. Таким чином, соняшникову мезгу, що йде на форпресування, необхідно вижарювати при 90⁰С, тоді при інших рівних умовах тиск в пресі більший, а це сприяє більш глибокому зніманню олії, що підтверджується практикою роботи пресів і технологічних інструкцій.

Однак при розгляді ущільнення «скелета» оброблюваного матеріалу, наростання повзучих деформацій доцільно описати залежністю, що характеризує зміну коефіцієнта пористості матеріалу [198] від питомого тиску.

Коефіцієнт пористості визначається як відношення обсягу пор до обсягу твердої фази «скелета» матеріалу (мезги) [6]

$$\varepsilon = \frac{V_{\Pi}}{V_T}, \quad (3.136)$$

де V_{Π} , V_T – відповідно об'єм пор і об'єм твердої фази.

Якщо прийняти, що об'єм твердої фази мезги V_T дорівнює об'єму мезги після виходу з останнього витка преса V_n , тобто $V_n = V_T$, то об'єм пор в k -ому витку $V_{\Pi} = V_k - V_n$. V_k – об'єм мезги в k -ому витку. Об'єм пор $V_{\Pi} = V_M + V_B$, де V_B – обсяг вільного повітря, сполученого з атмосферою, можливо частина з нього затиснена, тобто що не пов'язана з атмосферою. V_M – об'єм, займаний олією, що заповнює пори «скелета».

Статистична обробка експериментальних даних дозволила отримати ряд залежностей коефіцієнтів пористості мезги. На рис.3.29 наведені залежності коефіцієнтів пористості від питомого тиску в діапазоні від 0 до 137 кг/см² при температурі жаріння та пресування мезги 90⁰С та різної вологості [6].

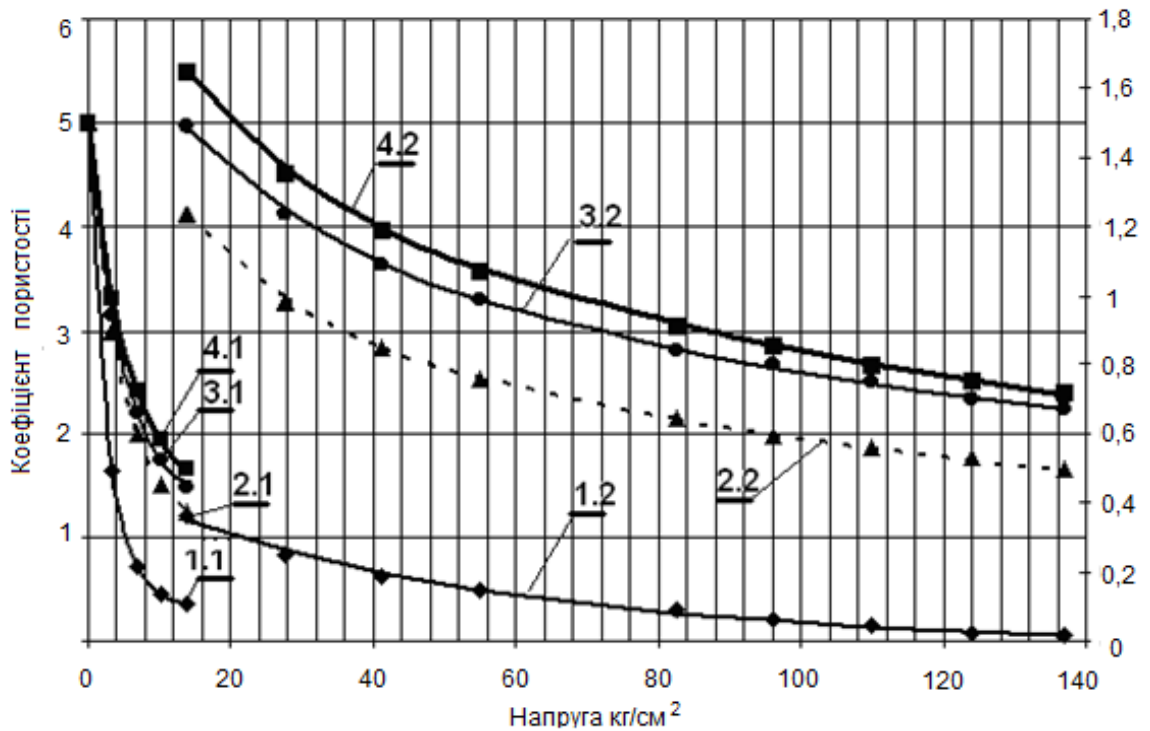


Рис 3.29. Залежність зміни коефіцієнта пористості від питомого тиску в діапазоні від 0 кг/см² до 137 кг/см² при температурі жаріння та пресування мезги 90⁰С: 1 – вологість 6,55%, 2 – вологість 1,8%, 3 – вологість 0,945%, 4 – вологість 0,22%

Як видно з рис.3.29 діапазон зміни питомого тиску і коефіцієнта пористості великий для отримання більш точної апроксимації і її параметрів. Тому розглянутий діапазон розбили на дві частини: питомим тиском до 13,75 кг/см² і з питомим тиском вище 13,75 кг/см². Наведені залежності описуються експонентними функціями

$$\varepsilon = a \cdot \exp(b \cdot \sigma) + c \cdot \exp(d \cdot \sigma), \quad (3.137)$$

де ε – коефіцієнт пористості;

σ – питомий тиск в меззі, кг/см²;

a, b, c, d – параметри експоненціальної функції.

Отримані параметри експоненційних функцій залежно від коефіцієнтів пористості і від питомого тиску представлені в табл.3.21.

Параметри експоненційних функцій
залежно від коефіцієнту пористості та від питомого тиску [253]

Коефіцієнти при вологості W%	Температура, град.С					
	80		90		100	
	0 – 13,75 кг/см ²	13,75-137 кг/см ²	0 – 13,75 кг/см ²	13,75-137 кг/см ²	0 – 13,75 кг/см ²	13,75-137 кг/см ²
W	4,31	4,31	6,55	6,55	2,02	2,02
<i>a</i>	4,257	0,121	4.551	-9.88E-04	4,037	1,474
<i>b</i>	-3,05E-01	-3,02E-02	-3.90E-01	1,70E-02	-2,32E-01	-1,48E-01
<i>c</i>	0,752	0,698	0.459	0.467	0,973	0,943
<i>d</i>	-1,61E-02	-1,43E-02	-2.22E-02	2.06E-02	-6,77E-03	-6,59E-03
W	1,88	1,88	1,8	1,8	1,6	1,6
<i>a</i>	3,891	1,266	3,953	0,748	3,892	0,603
<i>b</i>	-2,16E-01	-1,88E-02	-2,07E-01	-4,71E-02	-2,21E-01	-4,69E-02
<i>c</i>	1,119	0,193	1.057	0.889	1,118	0,942
<i>d</i>	-8,60E-03	-4,55E-03	-3.22E-03	-4.26E-03	-6,28E-03	-5,15E-03
W	0,51	0,51	0,945	0,945	0,5	0,5
<i>a</i>	3,614	0,792	3,834	0.752	3,6	0,888
<i>b</i>	-2,04E-01	-3,25E-02	-1,98E-01	-3,81E-02	-1,96E-01	-7,00E-02
<i>c</i>	1,397	1,031	1.178	1,089	1,411	1,280
<i>d</i>	-5,87E-03	-3,13E-03	4.09E-03	-3,57E-03	-6,85E-03	-5,74E-03
W	0,16	0,16	0,22	0,22	0,4	0,4
<i>a</i>	3,463	0,856	3,597	0,822	3,623	0,797
<i>b</i>	-1,84E-01	-4,74E-02	-1,87E-01	-4,59E-02	-1,93E-01	-4,45E-02
<i>c</i>	1,547	1,269	1,415	1,282	1,388	1,158
<i>d</i>	-8,05E-03	-4,00E-03	-1,58E-03	-4,31E-03	-5,46E-03	-4,02E-03

Закон стиснення в гвинтовому пресі визначався на основі експериментальних даних процесу фільтрації (консолідації) в лабораторних умовах (рис. 3.30).

На підставі встановленого закону стиснення визначається питомий тиск в кожному витку гвинтового вала, і на підставі цього визначаються всі перераховані діючі сили [6].

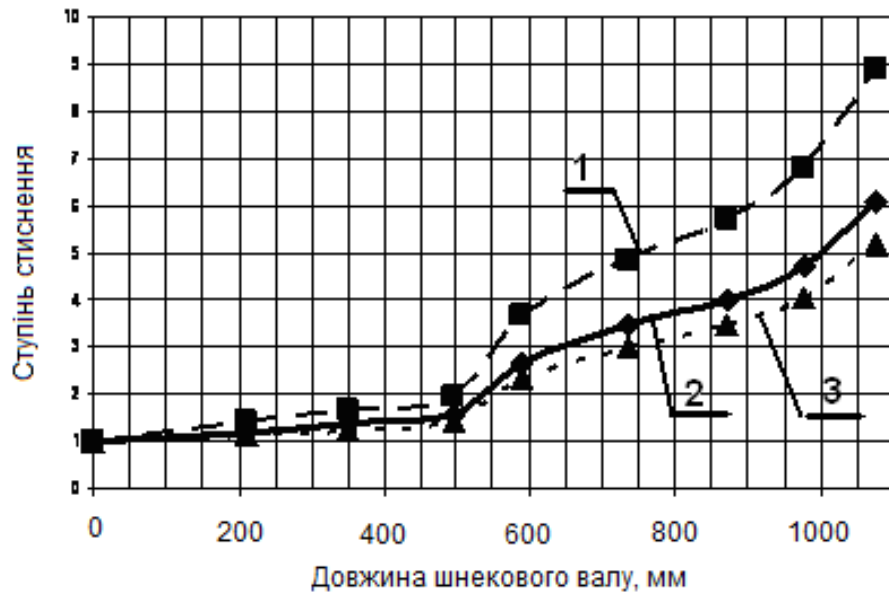


Рис 3.30. Ступінь стиснення мезги на витках гвинтового пресу при ширині вихідної щілини: 1 – 6 мм, 2 – 8 мм, 3 – 10 мм

При роботі всередині зеєра виникають п'ять течій: вимушений потік (пряма течія), протитечія, циркуляційний потік і дві течії витоку одна в зазорі між вершиною нитки і внутрішньої поверхнею зеєра, другий в куту розриву нитки витка. Гідродинаміка всіх п'яти течій, особливо течій витоку, впливає на ступінь стиснення мезги в робочій порожнині витків.

Для проведення числових досліджень отриманих рівнянь гідродинаміки необхідно експериментально визначити реологічні константи індексу течії і індексу її олійності і щільності мезги різного насіння при зміні режимів вологотеплової підготовки. Однак виток легко визначається експериментально-розрахунковим шляхом через коефіцієнти повернення.

Надалі для спрощення розрахунку порової рідини вважатимемо її нестисненою. Приймаємо, що порова рідина не підкоряється зсувним деформаціям. Таким чином, в ній виникає лише гідродинамічний тиск p .

Для спрощення розрахунку приймаємо, що тиск в поровій рідині не викликає в «скелету» мезги додаткову деформацію.

У мезгі, повністю насиченій олією, співвідношення фаз в одиниці об'єму, очевидно, контролюється її коефіцієнтом пористості $\varepsilon = V_{\Pi} / V_T$. Вільне нестиснене повітря, безпосередньо сполучається із зовнішньою атмосферою, не вимагає додаткового великого тиску при консолідації мезги. З причини малих швидкостей переміщення обох фаз фільтрації течій вважаємо ламінарним.

Рівняння нерозривності мезги в цілому [2,5,198]:

$$\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0. \quad (3.138)$$

У разі процесу пресування мезги і фільтрації олії через шар мезги, що переміщується по поверхні гвинтового вала «скелет» мезги деформується і, отже, знаходиться в русі щодо порової рідини. Процес фільтрації для такого випадку описується залежністю Дарсі - Герсеванова [5, 6, 199-215]

$$\left. \begin{aligned} u_x - \varepsilon v_x &= -k \left(\frac{\partial H}{\partial x} - i_0 \right); \\ u_y - \varepsilon v_y &= -k \left(\frac{\partial H}{\partial y} - i_0 \right); \\ u_z - \varepsilon v_z &= -k \left(\frac{\partial H}{\partial z} - i_0 \right); \end{aligned} \right\}, \quad (3.139)$$

де k – коефіцієнт фільтрації (знак мінус вказує, що рух рідини направлено в сторону зменшення напорів);

H –напір;

i_0 –начальний градієнт напору.

Диференціюючи рівняння Дарсі-Герсеванова для напрямків, отримаємо систему (3.140) [2,5,6]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial x} - \varepsilon_x \frac{\partial v_x}{\partial x} - v_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} &= -\frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial H}{\partial x}, \\ \frac{\partial u_y}{\partial y} - \varepsilon_y \frac{\partial v_y}{\partial y} - v_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} &= -\frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial H}{\partial y}, \\ \frac{\partial u_z}{\partial z} - \varepsilon_z \frac{\partial v_z}{\partial z} - v_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} &= -\frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial H}{\partial z}. \end{aligned} \right\} \quad (3.140)$$

Підсумовуємо рівняння (3.140) з урахуванням рівняння нерозривності рідкої фази, отримаємо рівняння фільтрації олії через шар мезги в гвинтовому пресі в декартовій прямокутній системі координат [2,5,6]:

$$\varepsilon \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \left(v_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + v_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) = \left(\frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right). \quad (3.141)$$

Напір визначається з відомої залежності [2,253]

$$H = \frac{p}{\gamma} + z, \quad (3.142)$$

де p – гідродинамічний тиск в поровій рідині;

γ – питома вага порової рідини (олії);

z – висота над площиною порівняння.

При постійних величинах коефіцієнтів фільтрації, k_x та k_y по осям відповідно x , y и k_z в осьових напрямках, нестисненої порової рідини [5, 6, 199-215]:

$$\frac{1}{\gamma} \left(\frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) = k_x \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + k_z \frac{1}{\gamma} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}. \quad (3.143)$$

Тоді рівняння фільтрації нестисливої рідини (олії) (3.141) в деформованому середовищі мезги в декартових координатах прийме наступний вигляд [5,253]:

$$\varepsilon \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \left(v_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + v_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) = k_\rho \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + k_z \frac{1}{\gamma} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}. \quad (3.144)$$

У пресованій масі має місце дві системи тиску: нейтральна і ефективна, а їх сума становить повний гідростатичний тиск. Нейтральний тиск визначається напором фільтруємої олії, ефективний тиск сприймається «скелетом» мезги. Розробка теорії про розподіл для будь-якого моменту часу тиску в поровій рідині є основним завданням теорії консолідації. Тому для використання отриманого рівняння фільтрації необхідно вивести рівняння консолідації мезги, за яким можна визначити нейтральний тиск в робочій зоні преса.

Продиференціюючи залежність (1.73) по декартовим осям координат:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} &= \left[ab \exp(b\sigma_{\Sigma_x}) + cd \exp(d\sigma_{\Sigma_x}) \right] \frac{\partial \sigma_{\Sigma_x}}{\partial x}; \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} &= \left[ab \exp(b\sigma_{\Sigma_y}) + cd \exp(d\sigma_{\Sigma_y}) \right] \frac{\partial \sigma_{\Sigma_y}}{\partial y}; \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} &= \left[ab \exp(b\sigma_{\Sigma_z}) + cd \exp(d\sigma_{\Sigma_z}) \right] \frac{\partial \sigma_{\Sigma_z}}{\partial z}; \end{aligned} \quad (3.145)$$

де $\sigma_{\Sigma_x}, \sigma_{\Sigma_y}, \sigma_{\Sigma_z}$ – сумарний питомий тиск на «скелет» мезги і гідродинамічний тиск олії.

Підставляючи значення (3.140) і (3.144) в рівняння (3.145) отримаємо рівняння консолідації мезги в гвинтовому пресі в декартовій системі координат в такому вигляді:

$$\begin{aligned}
& [a \cdot \exp(b \cdot \sigma) + c \cdot \exp(d \cdot \sigma)] \frac{\partial v_x}{\partial x} + [a \cdot \exp(b \cdot \sigma) + c \cdot \exp(d \cdot \sigma)] \frac{\partial v_y}{\partial y} + \\
& + [a \cdot \exp(b \cdot \sigma) + c \cdot \exp(d \cdot \sigma)] \frac{\partial v_z}{\partial z} + v_x [ab \exp(b \sigma_\Sigma) + cd \exp(d \sigma_\Sigma)] \frac{\partial \sigma_\Sigma}{\partial x} + \\
& + v_y [ab \exp(b \sigma_\Sigma) + cd \exp(d \sigma_\Sigma)] \frac{\partial \sigma_\Sigma}{\partial y} + v_z [ab \exp(b \sigma_\Sigma) + cd \exp(d \sigma_\Sigma)] \frac{\partial \sigma_\Sigma}{\partial z} = \\
& = k_\rho \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + k_z \frac{1}{\gamma} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}.
\end{aligned} \tag{3.146}$$

$$k_\rho \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + k_z \frac{1}{\gamma} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = q(x, y, z). \tag{3.147}$$

де

$$\begin{aligned}
q(x, y, z) = & [a \cdot \exp(b \cdot \sigma) + c \cdot \exp(d \cdot \sigma)] \frac{\partial v_x}{\partial x} + [a \cdot \exp(b \cdot \sigma) + c \cdot \exp(d \cdot \sigma)] \frac{\partial v_y}{\partial y} + \\
& + [a \cdot \exp(b \cdot \sigma) + c \cdot \exp(d \cdot \sigma)] \frac{\partial v_z}{\partial z} + v_x [ab \exp(b \sigma_\Sigma) + cd \exp(d \sigma_\Sigma)] \frac{\partial \sigma_\Sigma}{\partial x} + \\
& + v_y [ab \exp(b \sigma_\Sigma) + cd \exp(d \sigma_\Sigma)] \frac{\partial \sigma_\Sigma}{\partial y} + v_z [ab \exp(b \sigma_\Sigma) + cd \exp(d \sigma_\Sigma)] \frac{\partial \sigma_\Sigma}{\partial z}.
\end{aligned} \tag{3.148}$$

На початку процесу ущільнення олієнасиченою мезги миттєво виникають дотичні напруження при відсутності об'ємних деформацій і подальше поступове наростання тільки об'ємних деформацій і відповідних їм нормальних напружень, при незмінних дотичних напруженнях.

Відповідно до цього напруги в мезгі можуть бути для будь-якого моменту часу записані у вигляді [6, 199-215]:

$$\left. \begin{aligned}
\sigma_{\Sigma x} &= \sigma_x + p, \\
\sigma_{\Sigma y} &= \sigma_y + p, \\
\sigma_{\Sigma z} &= \sigma_z + p,
\end{aligned} \right\} \tag{3.149}$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, p$ – напруги в «скелеті» мезги та порового тиску в олії.

Підставивши у вираз (3.148) значення (3.149), отримано:

$$\begin{aligned}
 q(x, y, z) = & \left\{ a \cdot \exp[b(\sigma_x + p)] + c \cdot \exp[d(\sigma_x + p)] \right\} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \\
 & + \left\{ a \cdot \exp[b(\sigma_y + p)] + c \cdot \exp[d(\sigma_y + p)] \right\} \frac{\partial v_y}{\partial y} + \\
 & + \left\{ a \cdot \exp[b(\sigma_z + p)] + c \cdot \exp[d(\sigma_z + p)] \right\} \frac{\partial v_z}{\partial z} + \\
 & + v_x \left\{ ab \cdot \exp[b(\sigma_x + p)] + cd \cdot \exp[d(\sigma_x + p)] \right\} \frac{\partial \sigma_\Sigma}{\partial x} + \\
 & + v_y \left\{ ab \cdot \exp[b(\sigma_y + p)] + cd \cdot \exp[d(\sigma_y + p)] \right\} \frac{\partial \sigma_\Sigma}{\partial y} + \\
 & + v_z \left\{ ab \cdot \exp[b(\sigma_z + p)] + cd \cdot \exp[d(\sigma_z + p)] \right\} \frac{\partial \sigma_\Sigma}{\partial z}.
 \end{aligned} \tag{3.150}$$

Таким чином, було отримано еліптичний тип рівняння Пуассона в приватних похідних. Рішення рівняння (3.150) зводиться до задачі Діріхле - Неймана. У цьому завданні крайові умови на частини поверхні задаються функцією, що шукається p – тиском (задача Діріхле), а на частині поверхні задаються значення похідної $\frac{\partial p}{\partial n}$ – потоку через поверхню (завдання Неймана). Ми отримали два еліптичних рівняння Пуассона в приватних похідних.

У випадку, що досліджується, нижня, ліва і права поверхні кордону непроникні. Нормальні граничні умови для непроникних кордонів мають вигляд [2, 5, 6, 253]:

$$\frac{\partial}{\partial z} p(z_n, r_j) = p_z(z_n, r_j) = 0. \tag{3.151}$$

На проникному кордоні умови звичайно задаються або в швидкостях течій, або в тисках. У даному випадку проникною межею є циліндрична поверхня зеєра. Граничну умову зручно задати в швидкостях у вигляді (завдання Дирихле) [2, 5, 6, 199-215]:

$$v_n = -k_\phi \left(\frac{\partial p}{\partial x_n} \right) \Big|_\Sigma. \quad (3.152)$$

Значення нормальної складової швидкості повинно бути відоме для всіх точок кордону і для всього інтервалу часу.

Таким чином:

Використовуючи нове уявлення про одночасно протікаючі взаємопов'язані процеси віджиму мезги і фільтрації олії в робочій зоні витків гвинтового преса, досліджено математичну модель, що описує процеси зміни пористості мезги і гідродинамічного тиску в олії, що заповнює пори «скелета» мезги. Для замикання системи диференціальних рівнянь отримано нове реологічне рівняння, що описує взаємозв'язок коефіцієнта пористості від сумарного питомого тиску при різній температурі і вологості жаріння і пресування мезги.

Для проведення числових досліджень на підставі отриманої моделі необхідно провести додаткові експериментальні дослідження по визначенню наступних реологічних властивостей мезги: залежності між в'язкістю маси і різними параметрами, що впливають на неї, - олійністю, температурою, швидкістю зсуву і тривалістю зовнішніх впливів; залежності коефіцієнтів фільтрації олії від коефіцієнтів пористості; об'єм вільного повітря в меззі.

3.2.7. Оптимізація конструктивних параметрів шнекового преса для віджимання мезги насіння рицини

Визначення закону стиснення виконувалось з урахуванням методик [65]. Відповідно до цих методик отримано загальну залежність номеру витку шнекового пресу від оптимізованого ступеню стиснення, який повинен бути на даному витку, що пресує (рис. 3.31).

Відповідно, застосувавши обробку залежності (рис. 3.31) в EXCEL, змінення ступеня стиснення в залежності від номера витка можна підпорядкувати деякій закономірності (закон стиснення):

$$\varepsilon = 0,659e^{0,337 \cdot n}, \quad (3.153)$$

де n - номер пресуючого витка.

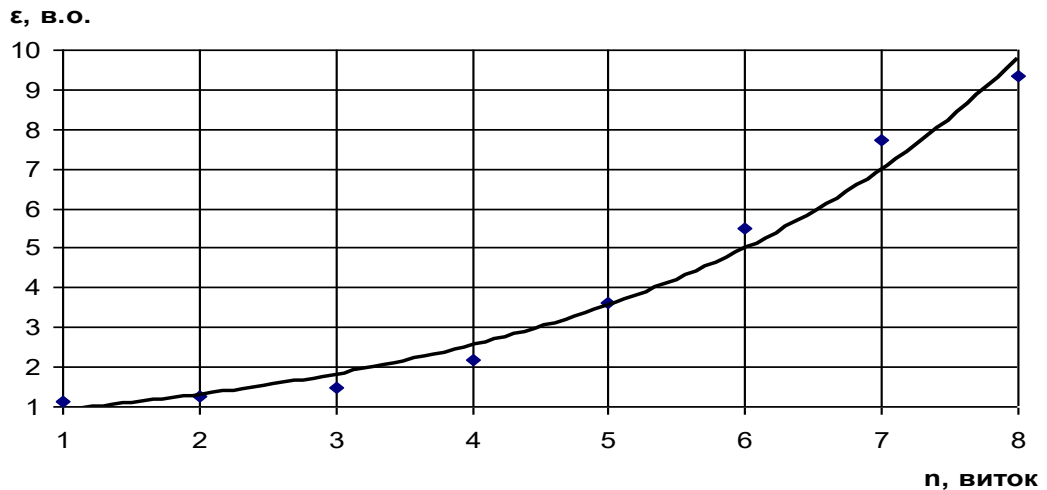


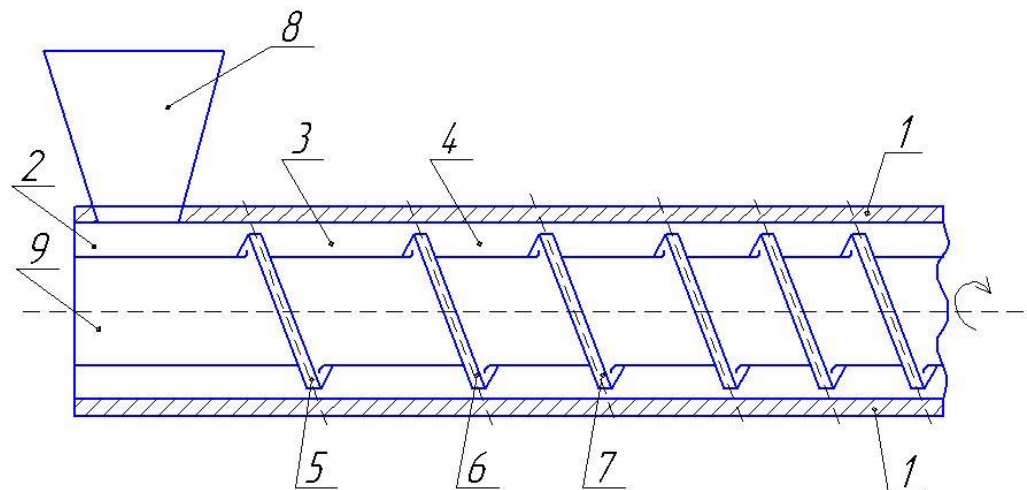
Рис. 3.31. Залежність ступеня стиснення від номера пресуючого витка шнекового пресу

Якщо врахувати те, що ступінь стиснення окремо на кожному витку шнекового пресу це відношення об'єму мезги у першому витку до об'єму мезги у кожному наступному витку відповідно, вільні об'єми між пресуючими витками за формулою:

$$V_n = \frac{V_1}{0,659e^{0,337 \cdot n}}, \quad (3.154)$$

де V_1 - об'єм мезги що завантажується у перший пресуючий виток шнекового пресу, м³;

V_n - об'єм мезги, що може знаходитися у n-ному пресуючому витку шнекового пресу, м³.



1 – зеєрний циліндр; 2 – вільний об’єм першого пресуючого витка ; 3, 4 - вільні об’єми наступних пресуючих витків; 5 – перший пресуючий виток; 6, 7 – наступні пресуючі витки; 8 – завантажувальний бункер; 9 – шнековий вал

Рис.3.32. Конструктивне виконання шнекового пресу на прикладі пресу зі змінним кроком гвинта

Вільний об’єм (поз.2 рис. 3.32) мезги першого пресуючого витка (поз. 5, рис. 3.32) визначає подальшу продуктивність шнекового пресу, необхідної для задоволення потреб виробника продукції. Знаючи такий об’єм (поз. 5, рис. 3.32) і номер пресуючого витка, можна визначити всі інші вільні об’єми (поз. 3, 4, і т.д. рис. 3.32) між іншими пресуючими витками (поз. 6, 7, і т.д. рис. 3.32) і далі, не змінюючи встановлені вільні об’єми між пресуючими витками, розрахувати всі інші конструктивні параметри такого шнекового пресу з урахуванням відповідної продуктивності.

Наприклад, виробник бажає отримати продуктивність шнекового пресу за ріщиною 15 тон на добу. При 8-часовому робочому дні, така продуктивність буде складати 1880 кг/год. При середньому часі перебування мезги у шнекових пресах близько 1,5 хвилини (0,025 години), вільний об’єм першого пресуючого витка повинен бути таким, щоб помістити 47 кг мезги насіння рицини. Після встановлення конструктивних параметрів вільного об’єму першого пресуючого витку, всі інші – розраховуються за рівнянням (3.33)

При встановленому законі стиснення, вихід олії окремо на кожному витку шнекового пресу відображений у залежності відносної маси олії від номеру витка (рис.

3.33). Як бачимо найбільший вихід олії відбувається на другому витку. На восьмому пресуючому витку вихід олії практично знижується до нуля. Тобто збільшення кількості витків більше вісьмох призведе тільки до зростання тиску в шнековому пресі та збільшення витрат потужності на пресування. Таким чином при пресуванні мезги насіння рицини достатня кількість пресуючих витків повинна складати витків.

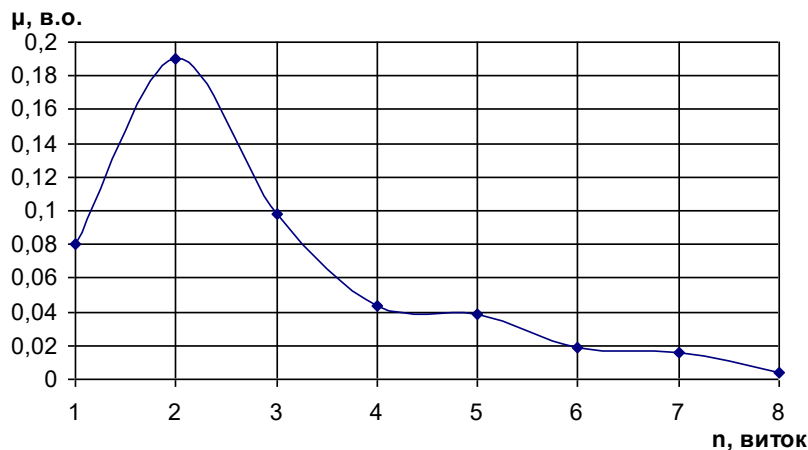


Рис. 3.33. Залежність відносної маси олії від номеру витка

Якщо використати залежність ступеня стиснення від номера пресуючого витка (рис. 3.31), отримаємо залежність відносної маси олії, що отримується на кожному ступені стиснення шнекових пресів (рис. 3.34). Як бачимо, конструктивне виконання витків, що пресують таким чином, щоб забезпечити ступінь стиснення вище позначки $\varepsilon = 9,4$ здійснювати непотрібно, так як вихід олії практично зупиняється.

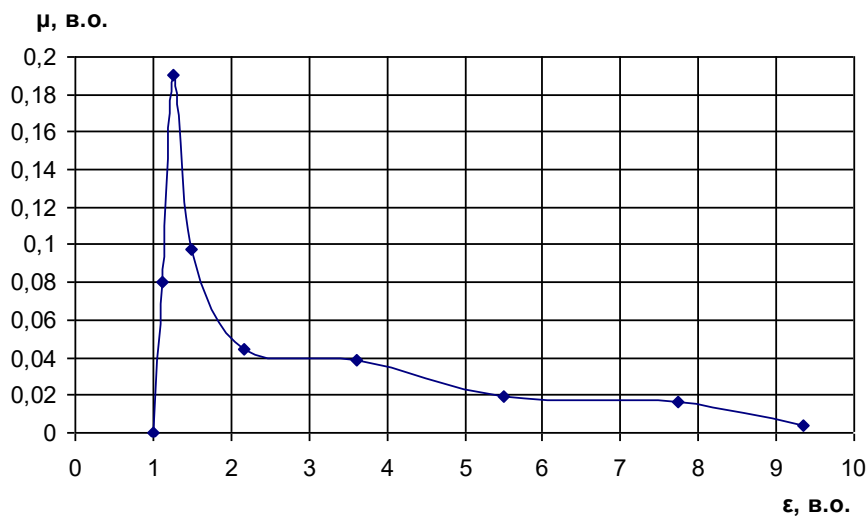


Рис. 3.34. Залежність відносної маси олії від ступеня стиснення

З урахуванням (рис. 3.33 та рис. 3.34), загальна відносна маса олії що отримано після пресування на вісьмох витках шнекового пресу складає $\mu = 0,496$. Максимальна ж олійність насіння рицини складає 55% [11] або можна записати як $\mu_{\max} = 0,55$. Відповідно, кількість олії після пресування, що залишилася у матеріалі буде визначено як:

$$\Delta\mu = \mu_{\max} - \mu = 0,55 - 0,496 = 0,054$$

Якщо це значення помножити на 100 %, то отримаємо остаточну олійність жмиху, яка складає 5,4%. У відповідності з [12], після першого пресування, остаточна олійність жмиху рицини повинна складати 8,5%. Тобто, завдяки оптимізації конструктивно-технологічних параметрів шнекових пресів, показник олійності жмиху рицини вдалося зменшити ще на $8,5 - 5,4 = 3,1\%$.

Також потрібно зазначити, що на ефективність пресування, впливає і ряд додаткових конструктивних параметрів, які забезпечують необхідний вільний об'єм між пресуючими витками: крок гвинта; діаметр робочої камери, висота пресуючих витків та їх поєднання [13, 14]. При встановленому законі стиснення для мезги насіння рицини, визначення оптимальних додаткових конструктивних параметрів є предметом подальших досліджень.

3.3. Математичне моделювання процесу очищення пресової рицинової олії

3.3.1. Математичне моделювання процесу очищення пресової рицинової олії

В різних галузях промисловості зараз відомо багато способів очищення технічних і харчових рідин. Відомо багато прикладів очищення рідин через пористу перегородку (фільтрація) [223]; очищення рідини за допомогою силових полів [223]; біологічні, хімічні та інші методи.

Для очищення рослинних олій переважно використовують фільтрацію за допомогою пористої перегородки, але за останній час ідуть пошуки нових способів очищення та їх комбінації. Серед таких комбінованих способів може бути той, що нами запропонований (патент України № 127279) [6], суть якого розкрита на рисунку 3.35. На рисунку 3.35.а - наведено експозицію пресової рицинової олії; на рис. 3.35.б – експозиція процесу гідратації при додаванні води 1,5-2%. На рис. 3.35.в – експозиція початку електрофорезу при подачі на електроди перемінної напруги до 5 кВ. рис. 3.35., г,д – експозиція початку і кінця електрофлотації при створенні на поверхні піни із фосфоліпідів, шлаків тощо.

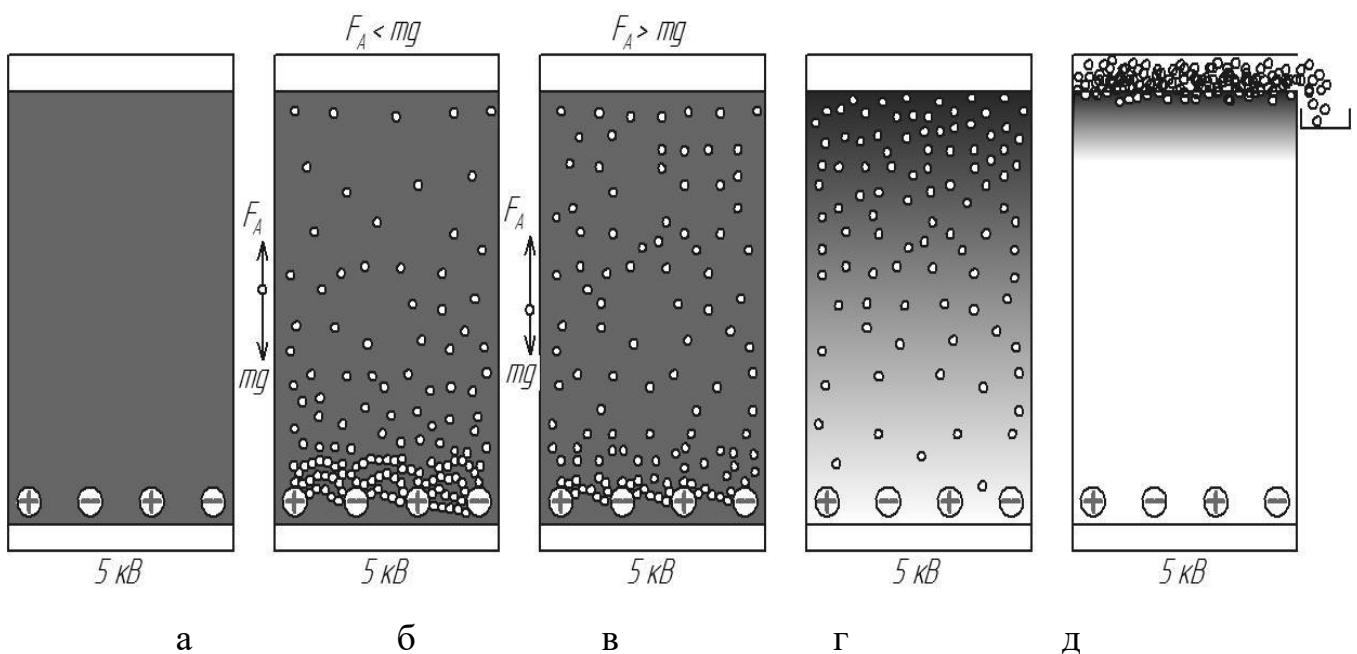


Рис.3.35. Схема процесу очищення рицинової олії способом електрофлотації: а - віджата рицинова олія; б – процес гідратації; в – процес електрофорезу; г – процес електрофлотації; д – завершення процесу електрофлотації

Після віджиму рицинової олії вона вміщує багато різних домішок, в тому числі фосфатиди, білки та інші механічні домішки, які роблять її непрозорою. Колір свіже віджатої пресом олії наведено на рис. 3.36.



Рис. 3.36. Віджата пресом олія рицини

Такий колір не може задовольнити користувача олії: вимоги стандартів потребують щоби колір був прозорим [209].

Для вилучення білків, фосфатидів та механічних домішок, що створюють темний колір проводять їх гідратацію додаванням до олії 1,5-2% води. В результаті взаємодії фосфатидів з водою виникають агрегати гідратованих фосфатидів, які не мають зв'язку з дисперсним середовищем і тому їх можна вилучити з олії використовуючи силову дію електричного поля на поляризовані частинки, та флотацію домішок парогазовими бульбашками.

Після гідратації залишки води, які не прийняли участі у гідратації, у вигляді дрібних крапель розміром до 50 мкм залишаються в суспензії і надають їй мутного білого кольору. Ці краплі також підлягають вилученню.

У зв'язку з тим, що рицинова олія має високу в'язкість, процес очищення доцільно вести при підвищеній температурі. Водоолійна емульсія створюється в результаті механічного перемішування мішалкою при температурі 50-70°C. Для проведення процесу очищення олії від гідратованих фосфатів і білків в електричному полі температуру суспензії потрібно довести до 85-95°C.

Електричне поле створюється системою паралельних циліндричних електродів діаметром 1-2 мм. Таке поле має велику неоднорідність і тому виникають значні електричні сили, які діють на поляризовані частинки фосфатидів і краплі залишкової

води. Ці сили направлені в бік найбільшого значення величини напруженості поля (по градієнту напруженості) тобто до поверхні електродів.

Величина сили, що діє на поляризовану частинку в неоднорідному електричному полі залежить від діелектричної проникності речовини частинки. В першому наближенні можна прийняти величину діелектричної проникності гідратованих фосфатидів та білків такою, що дорівнює діелектричній проникності води ($72 \cdot 10^{-11}$ Ф/м). Швидкість руху частинок до електродів зумовлена величиною електричної сили та сили опору в'язкого середовища.

При досягненні електроду гідратовані фосфатиди і краплі води попадають в поле з найбільшою напруженістю та градієнтом напруженості. Як показали попередні експериментальні дослідження, на поверхні електроду краплі води накопичуються та починається їх випаровування з утворенням дрібних парогазових бульбашок, розмір яких зумовлений величиною діаметра електроду. Такі дрібні бульбашки здатні виносити на поверхню олії гідратовані фосфатиди, які знаходяться в шарі олії над електродною системою, тобто здійснювати процес флотаційного очищення олії.

Час очищення від гідратованих фосфатидів, білків, механічних домішок і залишків води залежить від об'єму рідини в камері, конструкційних параметрів електродної системи та величини напруги на електродах. Величину напруги доцільно підтримувати на максимальному рівні, але меншому ніж напруга пробою рідини між електродами. Тому ефективність очищення олії буде залежати від створеної гідродинаміки частинок домішок, яку можливо дослідити шляхом математичного моделювання.

3.3.2. Гідродинаміка частинки домішок в рициновій олії під дією електричного поля в міжелектродному просторі

На підставі другого закону Ньютона складаємо рівняння руху кулі в рідині:

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} + \frac{9\eta}{2a^2} \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \right) - \frac{3}{4\pi a^3 \rho} \vec{F}_e(\vec{r}) = 0, \quad (3.155)$$

де \vec{r} – радіус-вектор, м;

Розглянемо рух краплі вздовж лінії, що з'єднує осі електродів.

В такому випадку потенціал електричного поля між двома паралельними циліндрами описується рівнянням [220]:

$$U(x) = U_{12} \frac{\ln\left(\frac{x-D}{x}\right)}{2 \cdot \ln\left(\frac{D}{R}\right)} \quad (3.156)$$

де U_{12} - різниця потенціалів між електродами, В;

D – відстань між осями електродів, м;

R – радіус електродів, м. ($R = \frac{d}{2}$)

Напруженість електричного поля визначається формулою:

$$E(x) = -\frac{dU}{dx} = -U_{12} \frac{D}{2 \cdot (x-D) \cdot x \cdot \ln\left(\frac{D}{R}\right)}, \quad (3.157)$$

Градiєнт напруженості поля:

$$\frac{dE}{dx} = U_{12} \frac{D(2x-D)}{2 \cdot (x-D)^2 \cdot x^2 \cdot \ln\left(\frac{D}{R}\right)} \quad (3.158)$$

В створеному неоднорідному електричному полі на краплі води та гідратовані фосфати діє сила, що забезпечує їх рух до поверхні електродів [219]:

$$\vec{F}_e = -4\pi \cdot \varepsilon_c \cdot a^3 \frac{\varepsilon_q - \varepsilon_c}{\varepsilon_q + 2\varepsilon_c} \left(E_x \frac{d\vec{E}}{dx} + E_y \frac{d\vec{E}}{dy} + \frac{d\vec{E}}{dz} \right), \quad (3.159)$$

де ε_c - ДП середовища, Ф/м; ($3 \cdot 10^{-11}$ Ф/м);

ε_q - ДП речовини кулі, Ф/м; ($60 \cdot 10^{-11}$ Ф/м)

\vec{E} - діюче значення вектору напруженості електричного поля, В/м.

Відповідно до формули (3.159) маємо:

$$\vec{F}_e = 4\pi \cdot \varepsilon_c \cdot a^3 \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_c}{\varepsilon_u + 2\varepsilon_c} \left(E_x \frac{\partial \vec{E}}{\partial x} \right), \quad (3.160)$$

$$\vec{F}_e = -4\pi \cdot \varepsilon_c \cdot a^3 \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_c}{\varepsilon_u + 2\varepsilon_c} U_{12}^2 \frac{D^2(2x-D)}{4 \cdot (x-D)^3 \cdot x \cdot \left(\ln\left(\frac{D}{R}\right) \right)^2}, \quad (3.161)$$

З формул (3.160) та (3.161) отримуємо диференційне рівняння другого порядку руху частинки у в'язкій рідині:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{9\eta}{2a^2\rho} \left(\frac{dx}{dt} \right) - \frac{3}{\rho} \cdot \varepsilon_c \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_c}{\varepsilon_u + 2\varepsilon_c} \left(\frac{D \cdot (U_1 - U_2)}{2 \cdot \ln\left(\frac{D}{R}\right)} \right)^2 \cdot \frac{2x-D}{(x-D)^3 \cdot x^3} = 0, \quad (3.162)$$

Це рівняння не розв'язується аналітично, тому використано числове розв'язання методом Рунге-Кутти в середовищі програми MATCAD.

Отримано залежності координати руху та швидкості частинки від часу, та її швидкості від часу при різних початкових умовах (рис. 3.37, рис. 3.38). Ці залежності отримані для електродів радіусом $R=1$ мм, при відстані між осями $D=10$ мм, напрузі на електродах $U_{12}=5$ кВ, для частинки радіусом $a=50$ мкм з $\varepsilon_u=6 \cdot 10^{-10}$ Ф/м, при в'язкості рідини $\eta=0,05$ Па·с (при $t=95^\circ\text{C}$) та $\varepsilon_c=3 \cdot 10^{-11}$ Ф/м і початковими координатами $x_{01}=1$ мм, $x_{02}=2$ мм, $x_{03}=3$ мм, $x_{04}=4$ мм.

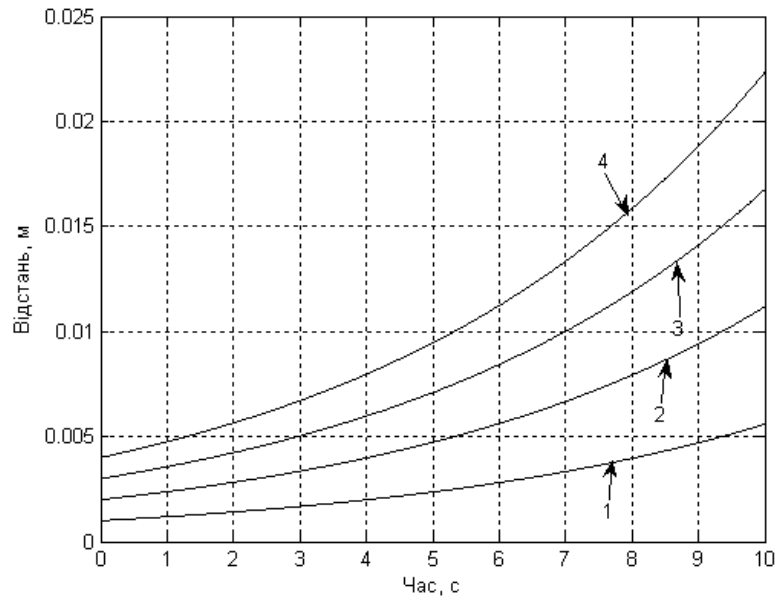


Рис. 3.37. Залежність відстані від часу при початку руху з точок з координатами: 1 - 0,001 м 2 - 0,002 м; 3 - 0,003 м; 4 - 0,004 м.

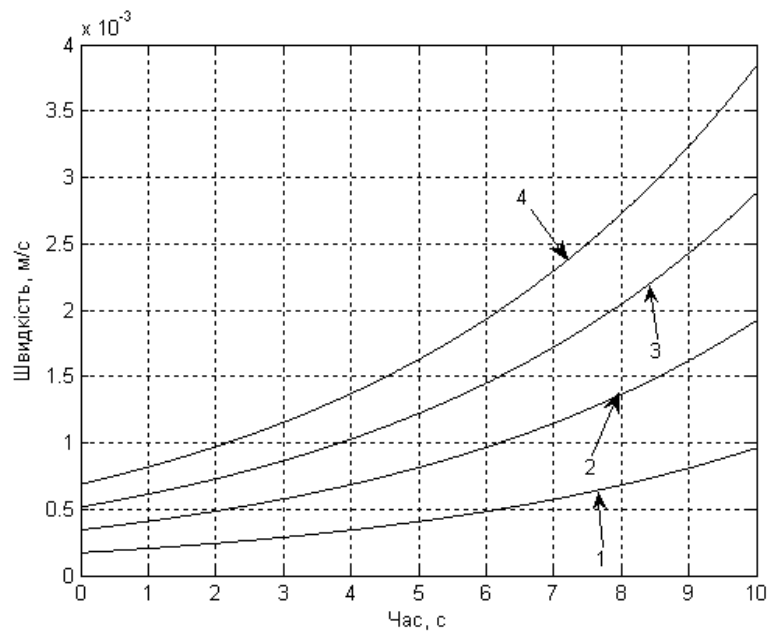


Рис. 3.38. Залежність швидкості від часу при початку руху з точок з координатами: 1 - 0,001 м 1 - 0,002 м; 1 - 0,003 м; 1 - 0,004 м.

З отриманих залежностей можна визначити швидкість частинки в момент стикування з електродом при різних початкових координатах. Аналіз залежностей рис. 3.37 і рис. 3.38 показав, що ця швидкість не залежить від початкової координати руху і для вказаних умов складає 0,8 мм/с. Аналогічні розрахунки було проведено для напруг на

електродах: 4,5 кВ; 4кВ; 3,5кВ; 3кВ. В результаті отримано залежність швидкості осадження частинок на електроди від величини напруги (рис.3.39).



Рис. 3.39. Залежність швидкості частинки в момент стикання з електродом від напруги

При роботі флотаційної камери в безперервному режимі об'єм води в одиницю часу, що подається в камеру дорівнює:

$$Q_v = N \cdot Q_c, \quad (3.163)$$

де Q_v – витрати води, $\text{м}^3/\text{с}$;

N – вміст води в суміші, в.о.;

Q_c - продуктивність процесу очищення, $\text{м}^3/\text{с}$.

Об'єм води в одиницю часу, що виділяється на електродах у вигляді пари:

$$Q_g = \pi \cdot N \cdot v \cdot d \cdot l, \quad (3.164)$$

де v – швидкість руху крапель води, $\text{м}/\text{с}$;

d – діаметр електроду, м ;

l - довжина електроду, м.

З рівняння балансу води в камері:

$$N \cdot Q_c = \pi \cdot N \cdot v \cdot d \cdot l, \quad (3.165)$$

отримуємо вираз для розрахунку загальної довжини електродів:

$$l = \frac{Q_c}{\pi \cdot v \cdot d}, \quad (3.166)$$

При роботі флотаційної камери в періодичному режимі зменшення об'єму води в одиницю часу, повинно дорівнювати об'єму води, що виділяється на електродах:

$$V \cdot \frac{dN}{dt} = \pi \cdot N \cdot v \cdot d \cdot l, \quad (3.167)$$

де V – об'єм камери, м³.

При розв'язанні цього диференціального рівняння отримуємо:

$$N = N_0 e^{-\frac{\pi \cdot v \cdot d \cdot l}{V}}, \quad (3.168)$$

де N_0 – початковий вміст води в суміші, в.о.

Отримане рівняння дозволяє розрахувати теоретичне значення зменшення вмісту води в олії з часом під дією електричного поля при різних умовах та порівняти результат з експериментальними даними.

Крім цього з рівняння (3.168) можна розрахувати потрібну довжину електродів для забезпечення технологічних вимог до процесу очищення:

$$l = -\frac{\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) \cdot V}{\pi \cdot v \cdot d \cdot t}, \quad (3.169)$$

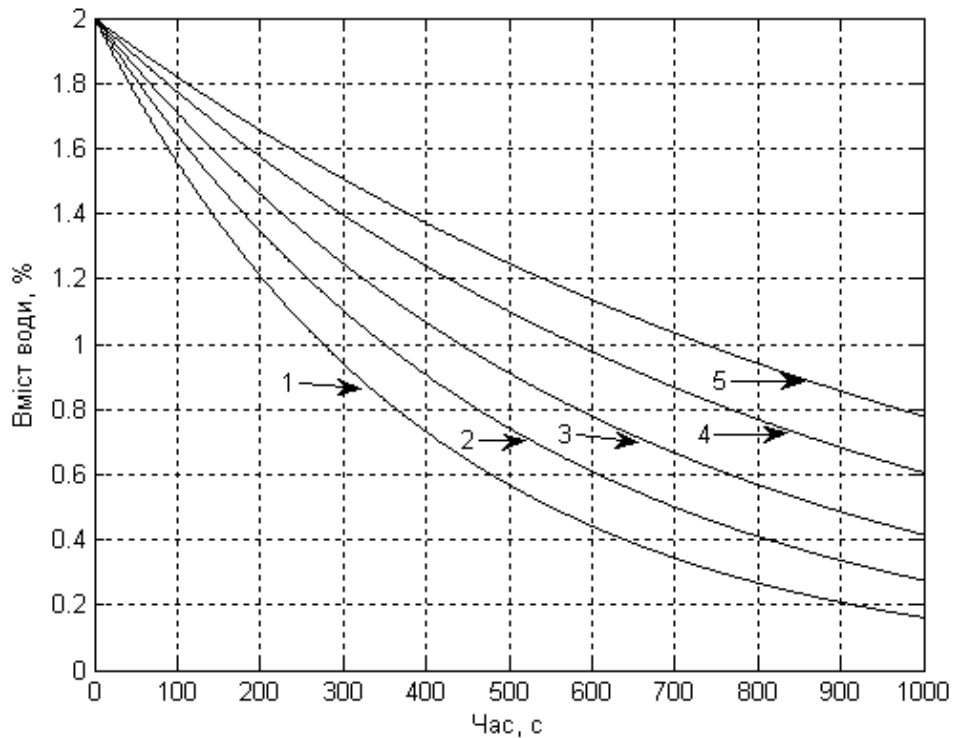


Рис. 3.40. Теоретичні залежності вмісту води від часу при напрузі на електродах: 1- 5 кВ; 2- 4,5 кВ; 3- 4 кВ; 4- 3,5 кВ; 5- 3 кВ.

Для перевірки математичної моделі процесу очищення рицинової олії в електричному полі було побудовано графічні залежності вмісту води в олії від часу за формулою (3.168) при напругах на електродах: 3 кВ; 3,5 кВ; 4 кВ; 4,5 кВ; 5 кВ, що відповідають швидкостям осадження на електроді 0,3 мм/с, 0,38 мм/с, 0,5 мм/с, 0,63 мм/с, 0,8 мм/с відповідно графіку рис. 3.38 та рис. 3.39, порівняно з експериментальними даними. Отримані теоретичні залежності рис. 3.40 побудовані для об'єму рідини 10^{-3} м³, діаметру електродів 10^{-3} м, довжини електродів 1 м та початкового вмісту води 2 %. Для підтвердження отриманих теоретичних залежностей рис. 3.40 було розроблено методику та проведено відповідні експериментальні дослідження з очищення рицинової олії в електричному полі.

3.3.3. Гідродинаміка парогазової бульбашки в рициновій олії

Метою дослідження руху парогазової бульбашки в рициновій олії є оцінка часу протікання процесу флотації бульбашками.

Парогазові бульбашки утворюється на електродах та під дією сили Архімеда рухаються до поверхні рідини (рис. 3.35). Для створення математичної моделі руху парогазової бульбашки розглянемо в'язку рідину, яка вміщує парогазові бульбашки. Запишемо рівняння другого закону Ньютона у наступному вигляді:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_c + \vec{F}_g, \quad (3.170)$$

Для парогазової бульбашки у вигляді кулі з урахуванням силу опору в'язкої рідини отримуємо рівняння динаміки:

$$\rho_n \frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{9}{2a^2} \eta \vec{v} + g(\rho_c - \rho_n), \quad (3.171)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с^2 .

ρ_n – щільність водяної пари, кг/м^3 .

Припускаємо, що парогазові бульбашки рухаються лише вертикально, тому можемо перейти від векторного рівняння до скалярного:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{9\eta}{2\rho_n a^2} \frac{dy}{dt} + \frac{g}{\rho_n} (\rho_c - \rho_n), \quad (3.172)$$

де y - вертикальна координата, м.

Рівняння (3.172) являє собою лінійне диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами та правою частиною. Розв'язання такого рівняння складається з загального розв'язання відповідного рівняння без правої частини та окремого розв'язання [221]:

$$y = \bar{y} + \bar{\bar{y}}, \quad (3.173)$$

де \bar{y} – загальне розв'язання рівняння;

$\bar{\bar{y}}$ – окреме розв'язання рівняння.

Для отримання загального розв'язання рівняння (3.173) складемо його характеристичне рівняння

$$\gamma^2 + \frac{9\eta}{2a^2\rho_n}, \quad (3.174)$$

Його корні $\gamma_1 = -\frac{9\eta}{2a^2\rho_n}$, $\gamma_2 = 0$, тому загальне розв'язання рівняння без правої частини буде

$$\bar{y} = C_1 e^{\gamma_1 t} + C_2, \quad (3.175)$$

Рівняння (3.172) має окреме розв'язання виду [221,222]:

$$y = C_3 t, \quad (3.176)$$

і після підстановки його в рівняння (3.172) отримуємо значення коефіцієнту

$$C_3 = \frac{2g(\rho_c - \rho_n)a^2}{9\eta}, \quad (3.177)$$

Загальне розв'язання рівняння (3.172) буде

$$y = C_1 e^{\gamma_1 t} + C_2 + C_3 t \quad (3.178)$$

Для знаходження окремого розв'язання цього рівняння при початкових умовах $t_0 = 0$, $y(t_0) = y_0$, $\frac{dy}{dt}(t_0) = V_0$ знайдемо похідну

$$\frac{dy}{dt} = C_1 \gamma_1 e^{\gamma_1 t} + C_3, \quad (3.179)$$

Підставивши початкові умови у рівняння (3.177), (3.178) отримуємо систему:

$$\left. \begin{aligned} y_0 &= C_1 + C_2 \\ V_0 &= C_1 \gamma_1 + C_3 \end{aligned} \right\}, \quad (3.180)$$

З неї знаходимо

$$C_1 = \frac{V_0 - C_3}{\gamma_1}, \quad C_2 = y_0 - \frac{V_0 - C_3}{\gamma_1}, \quad (3.181)$$

Шукане окреме розв'язання є

$$y = \frac{V_0 - C_3}{\gamma_1} e^{\gamma_1 t} + y_0 - \frac{V_0 - C_3}{\gamma_1} + C_3 t, \quad (3.182)$$

$$v = (V_0 - C_3) e^{\gamma_1 t} + C_3, \quad (3.183)$$

Для рицинової олії з $\eta = 5 \cdot 10^{-2}$ Па·с, $\rho_{п}=0,5$ кг/м³, $\rho_{с}=960$ кг/м³ за отриманими формулами побудовано залежності відстані від часу та швидкості від часу для бульбашок різного діаметру, які показані на рис. 3.41, рис. 3.42.

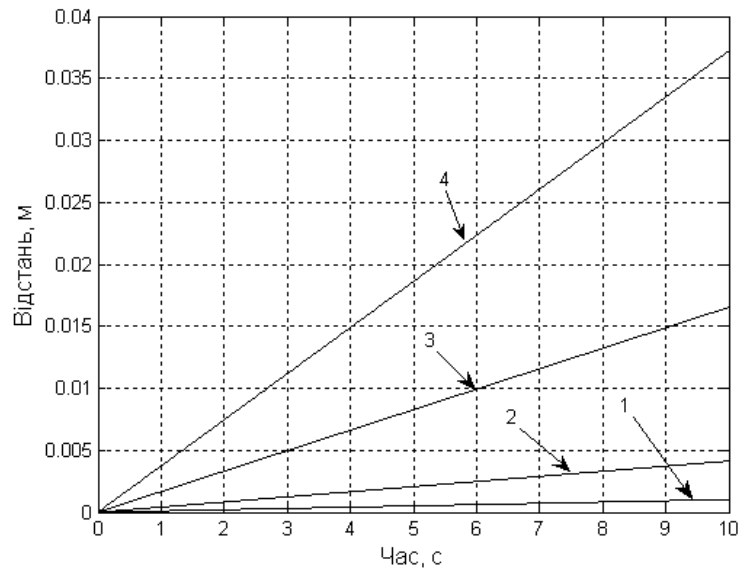


Рис. 3.41. Залежності відстані від часу спливання бульбашок радіусом: 1- 50 мкм; 2 - 100 мкм; 3 - 200 мкм; 3 - 300 мкм.

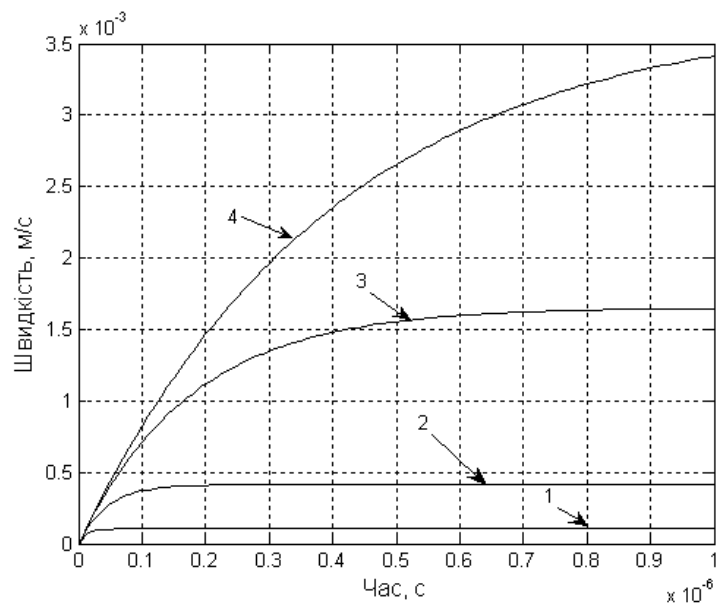


Рис. 3.42. Залежності швидкості від часу спливання бульбашок радіусом: 1- 50 мкм; 2 - 100 мкм; 3 - 200 мкм; 3 - 300 мкм.

Аналіз цих залежностей показує, що стабілізація швидкості руху парогазових бульбашок відбувається за короткий проміжок часу, що складає близько 10^{-6} с, а швидкість в залежності від діаметру лежить в межах від 0,1 мм/с до 3,5 мм/с. Ці значення свідчать, що процес флотації не є лімітуючим за часом процесу очищення рицинової олії.

3.3.4. Гідродинаміка крапель води в рициновій олії

Після перемішування краплі води, рівномірно розподілені в об'ємі олії, починають рухатись під дією сили тяжіння [76-78]. Для краплі води у вигляді кулі з урахуванням сили опору в'язкої рідини руху частинки отримуємо рівняння динаміки:

$$\rho_w \frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{9}{2b^2} \eta \vec{v} + g(\rho_w - \rho_c) \quad (3.184)$$

де ρ_w - щільність води, кг/м³;

b - радіус краплі води, м.

Краплі води під дією сили тяжіння рухаються лише вертикально, тому можемо перейти від векторного рівняння до скалярного:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{9\eta}{2\rho_w a^2} \frac{dy}{dt} + \frac{g}{\rho_w} (\rho_w - \rho_c) \quad (3.185)$$

Рівняння (3.185) являє собою лінійне диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами та правою частиною. Розв'язання такого рівняння складається з загального розв'язання відповідного рівняння без правої частини та окремого розв'язання (3.173) [223]. Для отримання загального розв'язання рівняння (3.185) складемо його характеристичне рівняння

$$\gamma^2 + \frac{9\eta}{2a^2 \rho_w} \gamma = 0, \quad (3.186)$$

Його корні $\gamma_1 = -\frac{9\eta}{2b^2 \rho_w}$, $\gamma_2 = 0$, тому загальне розв'язання рівняння без правої частини буде

$$\bar{y} = C_1 e^{\gamma_1 t} + C_2, \quad (3.187)$$

Рівняння (3.185) має окреме розв'язання виду [225]:

$$y = C_3 t, \quad (3.188)$$

і після підстановки його в рівняння (3.185) отримуємо значення коефіцієнту

$$C_3 = \frac{2g(\rho_s - \rho_c)b^2}{9\eta}, \quad (3.189)$$

Загальне та окреме розв'язання рівняння відповідає формулам (3.176)...(3.181).

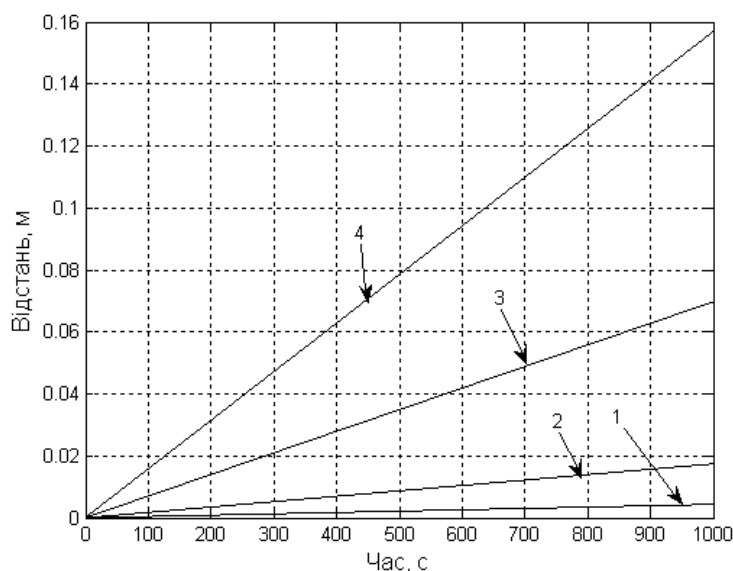


Рис. 3.43. Залежності відстані від часу осадження крапель води радіусом: 1 – 50 мкм; 2 – 100 мкм; 3 – 200 мкм; 3 – 300 мкм.

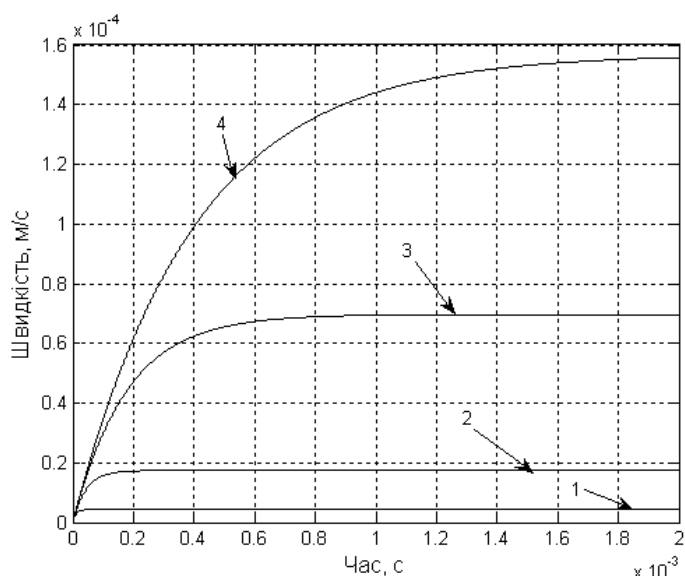


Рис. 3.44. Залежності швидкості від часу осадження крапель води радіусом: 1 – 50 мкм; 2 – 100 мкм; 3 – 200 мкм; 3 – 300 мкм.

Для рицинової олії з $\eta = 5 \cdot 10^{-2}$ Па·с, $\rho_v = 1000$ кг/м³, $\rho_c = 960$ кг/м³ за отриманими формулами побудовано залежності відстані від часу та швидкості від часу для крапель води різного діаметру, які показані на рис. 3.43, рис. 3.44.

Аналіз цих залежностей показує, що час стабілізації швидкості руху крапель води на три порядки більше за час стабілізації швидкості парогазових бульбашок, а швидкість в залежності від діаметру крапель лежить в межах 0,01 мм/с до 0,16 мм/с. Ці значення свідчать, що процес осадження крапель води є лімітуючим за часом процесу очищення рицинової олії.

3.3.5. Кінетика флотаційного очищення рицинової олії

Процес утворення комплексу частинка – бульбашка, що протікає на межі розділу трьох фаз (частинка – парогазові бульбашки – олія), складається із наступних стадій [6]:

- 1) зближення частинки з парогазовою бульбашкою (при співанні бульбашок)
- 2) контакт частинки з бульбашкою;
- 3) закріплення бульбашки на частинці (прилипання).

Міцність комплексу, що утворився, залежить від розмірів частинок і бульбашок, фізико-хімічних властивостей частинок і рідини (гідрофобність поверхні частинок і їх щільність, поверхнєве натягнення та ін.), гідродинамічних умов і ін.

Для руйнування комплексів повинна бути витрачена робота:

$$A = \sigma_{o.g.} (1 - \cos\theta) \quad (3.190)$$

де $\sigma_{o.g.}$ – поверхнєве натягнення олії на межі з паром, Н·м;

θ – крайовий кут змочування поверхні частинок.

Для частинок, добре змочуваних олією ($\sigma \rightarrow 0$, $\cos\theta \rightarrow -1$), міцність прилипання мінімальна, а для гідрофобних частинок - максимальна. Якнайкращі умови прилипання створюються при відносно невеликих швидкостях переміщення частинок і бульбашок та підвищенні температури.

Важливим показником є стійкість пінного шару. Недостатня міцність піни не дає можливості своєчасно видалити пінний продукт з поверхні олії. Надмірна стійкість піни затрудняє її подальшу обробку. Кінетика флотаційного видалення домішок може бути описана відомим рівнянням:

$$1 - C_{оч.} = e^{-kt} \quad (3.191)$$

де $C_{оч.}$ - ступень видалення домішок в пінний шар (ступень очищення), в.о.;

k - коефіцієнт швидкості флотації, 1/с;

t - час, с.

Ефективність очищення олії флотацією при закріпленні бульбашок на частинках за рахунок їх зіткнень може бути оцінена по рівнянням [215]:

$$C_{оч.} = \frac{1}{H \cdot n \cdot \alpha} (1 - e^{-Hn\alpha}) \quad (3.192)$$

де H – висота шару олії в апараті флотації, м;

n – лінійна щільність бульбашок, 1/м;

α – вірогідність закріплення бульбашки на частинці.

3.3.6. Висновки до розділу 3

1. Отримала подальший розвиток фізична модель процесу волого-теплової підготовки м'ятки рицини перед віджимом олії та установлені графо-аналітичним методом, гідродинамічні режими руху м'ятки в чанах жаровні, а саме: визначено залежність часу руху

частинки м'ятки по лопатці та швидкості сходження її з лопатки в залежності від кутової швидкості мішалки; запропановано методику визначення швидкості, первинної і вторинної циркуляції в чані жаровні. Це дало можливість розробити нову математичну модель тепломасопереносу і фазових перетворень в дисперсному шарі зволоженої олійної сировини в процесі жаріння у багаточанній жаровні при кондуктивному підведенні енергії та наявності турбінної мішалки, яка на відміну від існуючих математичних моделей дозволяє розрахувати як кінетику, так і динаміку сумісних процесів, переносу теплоти і маси у дисперсному вологому шарі, що представляє інтенсивність фазових перетворень. Модель містить диференційні рівняння дифузійно-фільтраційного переносу енергії в дисперсному шарі колоїдного капілярно-пористого матеріалу, та маси рідкої, порової і повітряної фаз в його порах. Сформульовані відповідні граничні умови.

2. Розроблено числовий метод, який базується на явній тришаровій перерахунковій різницевій схемі М.І. Нікітенко, який на відміну від широкозастосовуваних програмних пакетів дозволяє сумісно вирішити систему нелінійних диференційних рівнянь дифузійно-фільтраційного тепло- і масопереносу, що складають математичну модель. Отримані умови стійкості різницевих рівнянь. Побудовано алгоритм і створено програмний комплекс, що може використовуватись для розрахунку динаміки і кінетики тепломасопереносу і фазових перетворень в процесі жаріння дисперсного шару будь-якої олійної сировини в багаточанних жаровнях безперервної дії циліндричної конфігурації з довільними геометричними параметрами.

3. Проведено математичне моделювання процесу жаріння м'ятки рицини для різних вихідних умов та порівняння результатів числових досліджень з даними балансових розрахунків. Розбіжність не перевищує 7 %, що свідчить про адекватність математичної моделі і точність числового методу.

4. Розроблені математична модель, метод і програма розрахунку динаміки і кінетики жаріння зволоженої м'ятки дозволяють визначати зміну температури та об'ємних концентрацій кожного компонента в будь-якій точці об'єму зволоженого дисперсного шару в довільний момент часу, а також тривалість процесу жаріння в залежності від початкових, фізичних і геометричних параметрів олійної сировини. Ці результати створюють основу при виборі оптимальних технологічних параметрів волого-теплової обробки

даного виду м'ятки з точки зору енергоефективності процесу та якісних і кількісних показників виготовляємої олії, а також при виборі оптимальних конструкційних параметрів при створенні відповідного обладнання.

5. Отримано математичні моделі динаміки руху крапель води і гідратованих фосфатидів та механічних домішок в рициновій олії в електричному полі, яке створено системою паралельних циліндричних електродів. Розв'язання цього рівняння дозволило визначити швидкість осадження крапель на електроди. Доведено, що швидкість осадження за певними припущеннями не залежить від початкової координати руху крапель в між електродному просторі і складає величину в межах від 0,3 мм/с до 0,8 мм/с при зміні напруги від 3 до 5 кВ. Це пояснюється дією електричного поля і відповідної сили тільки на невеликій відстані від електроду.

6. Отримані теоретичні залежності швидкості осадження крапель від напруги на електродах дозволяють розрахувати час видалення вологи і гідратованих фосфатидів та механічних домішок з рицинової олії та конструкційні параметри системи електродів. Для забезпечення продуктивності установки 0,07 л/хв. для зменшення вмісту крапель води з 2 % до 0,2%. Довжина електродів повинна складати 1 м, їх діаметр 2 мм при відстані між електродами 1 см та напрузі на електродах 5 кВ.

7. Отримані математичні моделі динаміки руху парогазових бульбашок та гідратованих фосфатидів і механічних домішок сумісно з краплями води. Дослідження цих трьох моделей дозволило встановити час вилучення домішок в процесі флотації та час осадження крапель води і гідратованих фосфатидів під час їх руху в міжелектродному просторі, що надало розрахунковий час очищення, яким є час осадження крапель води з гідратованими фосфатидами. При мінімально високому шарі олії у флотаційній камері лімітуючим часом стає тривалість руху частинок в між електродному просторі. Це дозволяє розробити алгоритм інженерного розрахунку конструкційних параметрів флотаційної камери.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Програма і методика експериментальних досліджень

Виходячи із сформульованих у розділі 3 «Математичне моделювання технологічних процесів переробки рицини» задач в якості програмних питань експериментальних досліджень є наступні:

1. Установити основні термодинамічні характеристики елементів насіння рицини
2. Визначити енергію зв'язку вологи з компонентами насіння рицини
3. Визначити комплексні показники ефективності технологічних процесів переробки рицини
4. Перевірка адекватності математичних моделей віджимання і фільтрації касторової олії

Методика експериментальних досліджень по якій виконувалася програма досліджень по П.1 полягала у наступному: попередньо зважували з точністю до третього знаку після коми еталонне тіло (листи фільтрувального паперу) в такій кількості, щоб достатньо було заповнити половину металевого циліндра спеціального контейнера (рис. 4.1). Спеціальний контейнер, що використовувався в експериментальних дослідженнях, складається з полого-металевого циліндра з нарізаною з двох сторін внутрішньою різьбою для ущільнюючих болтів. Протягом всіх дослідів маса еталонного матеріалу не змінювалась. Потім зважували з точністю до третього знаку після коми навіску м'ятки насіння рицини визначеного складу (подрібнене ядро, лушпиння, рущанка). В процесі досліджень змінювали її вологість від 6 % до 14 %. Зволоження матеріалу здійснювалося розпилюванням води.

Таким чином, контролювалася маса навіски матеріалу до та після зволоження.

Після цього дві навіски (еталонне тіло та матеріал, що досліджується), поміщали в металевий циліндр та спресовували з двох сторін гвинтами. Різьбові з'єднання металевого циліндра ущільнювали сантехнічною стрічкою. Контейнери з матеріалами, що досліджуються поміщали в термостат при температурі 25°C і проводили їх відлежування. Після, металеві циліндри відкривали і визначали маси та вологості зразку, що досліджується і еталонного тіла. Вологості зразків визначали шляхом висушування їх до абсолютно сухої маси за методикою, наведеною в [5].



Рис. 4.1. Контейнер для визначення потенціалу масопереносу.

В перших дослідах визначали необхідний час відлежування зразків в контейнерах. Перевірялися варіанти витримування зразків в контейнері 24, 48, 72 та 96 годин. В результаті було встановлено, що з достатнім ступенем точності можна вважати настання термодинамічної рівноваги матеріалів, що досліджуються (при термодинамічній рівновазі потенціали переносу вологи рівні) не більше 96 годин. В подальших дослідах відлежування проводили на протязі 96 годин. Всі досліди проводили в трикратній повтoрності.

Основними термодинамічними параметрами (які необхідно було визначити) є вологовміст тіла та потенціал масопереносу [6, 48, 198].

Потенціал масопереносу визначається по вологовмісту еталонного тіла. В якості еталонного тіла, як правило, вибирається целюлоза у формі листів фільтрувального паперу [6].

Отже,

$$\theta = \frac{u_{\text{э}}}{(c_{m\text{э}})_T}, \quad (4.1)$$

де θ - потенціал масопереносу, °М;

$u_{\text{э}}$ - вологовміст еталонного тіла, кг/кг;

$(c_{m\text{э}})_T$ - питома ізотермічна масоємкість еталонного тіла.

Питома ізотермічна масоємкість еталонного тіла за [6] приймається рівною 1/100 максимального сорбційного вологовмісту еталонного тіла:

$$(c_{mэ})_T = \frac{1}{100} \cdot u_{cm}, \quad (4.2)$$

де u_{cm} - максимальний сорбційний вологовміст еталонного тіла, кг/кг.

Тобто, питомому вологовмісту еталонного тіла відповідає потенціал в 100 масообмінних градусів. Таким чином, при дослідженнях, потенціал переносу будемо визначати як:

$$\theta = \frac{uэ}{(u_{cm})_T} \cdot 100. \quad (4.3)$$

Для фільтрувального паперу, при температурі 25 °С, $u_{cm} = 0,277$ кг/кг [6].

Для побудови масообмінних характеристик, необхідно знати і вологовміст тіла, що досліджується. Для цього, визначають такі параметри:

- маса води у матеріалі, що досліджується:

$$g_{вол} = g - g_{с.реч}, \quad (4.4)$$

де g - загальна вага вологого матеріалу, кг;

$g_{с.реч}$ - маса сухої речовини, кг;

- вологість матеріалу по відношенню до загальної маси (у %):

$$w = \frac{g_{вол}}{g_{с.реч}} * 100 \quad ; \quad (4.5)$$

- маса води, що потрібна для зволоження матеріалу з вологості w_1 до вологості w_2 :

$$\Delta g_{вл} = g_1 \frac{w_2 - w_1}{100 - w_1} ; \quad (4.6)$$

- якщо вологість матеріалу по відношенню до маси сухої речовини виразити в кг/кг сухої речовини, то отримаємо вологовміст матеріалу, що досліджується:

$$u = \frac{g_{вол}}{g_{с.реч}} \quad (4.7)$$

Термодинамічним параметром масообміну, який зв'язує вологовміст тіла, що досліджується з потенціалом масопереносу є питома ізотермічна масоємкість c_m . Для побудови характеристики $c_m = f(u)$, питома ізотермічна масоємкість буде визначатися за формулою:

$$c_m = \left(\frac{\partial u}{\partial \theta} \right)_T \quad (4.8)$$

Відповідно, з цієї формули та із застосуванням законів інтегрального числення, питома масоємкість буде чисельно дорівнюватися тангенсу кута нахилу дотичної до кривої $u = f(\theta)$.

Згідно цієї методики буде отримано залежності вологовмісту матеріалу, що досліджується від потенціалу переносу $u = f(\theta)$ та питомої ізотермічної масоємкості від вологовмісту матеріалу, що досліджується $c_m = f(u)$.

Методика експериментальних досліджень по якій виконувалася програма досліджень по П.2 полягала у наступному:

На дно ексикатора встановлювали скляну ємність з сірковою кислотою (близько 100 мл) в наступних концентраціях: в першому ексикаторі – 25%, в другому – 45%, в третьому – 65%, та четвертому – 85%. Відповідно, сіркова кислота визначеної концентрації буде створювати визначену і постійну вологість навколишнього повітря. Зверху встановлювався решітчастий фарфоровий піддон, на який в подальшому будуть встановлюватися бюкси з матеріалами, що досліджуються.

В подальшому зважували кожен з дванадцяти пустих бюкс з точністю до третього знаку після коми. В перші чотири пусті бюкси поміщали ядро насіння рицини, в другі чотири пусті бюкси поміщали лушпиння насіння рицини, в треті чотири пусті

бюкси поміщали рушанку насіння рицини та повторно зважували кожен бюкс з матеріалом, що досліджується до третього знаку після коми.

Потім брали по три бюкси (одна – з ядром, друга – з лушпинням, третя – з рушанкою) поміщали в кожний з чотирьох ексикаторів та закривали кришкою. Ексикатори поміщали в термошафу. На протязі всіх дослідів температура в термошафі підтримується постійною (в досліді прийнята 20 градусів)

Час від часу бюкси з матеріалами що досліджуються зважували на вагах з точністю до третього знаку після коми, поки не була отримана постійна вага, яка означала про настання рівноваги між водяною парою і вологою матеріалу.

Вологість повітря в ексикаторі визначали за [6] в залежності від питомої ваги (концентрації) сіркової кислоти.

Вологовміст матеріалу, що досліджується визначали за (4.7). Масу води у матеріалі, що досліджується визначали за (4.4). Вологість матеріалу по відношенню до загальної маси (y %) визначали за (4.5).

Методика визначення маси сухої речовини матеріалу, що досліджується виконувалася згідно ГОСТ 5947-68 [5].

Таким чином, для проведення експериментальних досліджень, необхідно мати наступне обладнання та матеріали:

- чотири ексикатори;
- термошафу для підтримання постійної температури;
- ваги з точністю до третього знаку після коми;
- сіркову кислоту визначеної концентрації;
- матеріал, що досліджується (ядро та лушпиння рицини).

Згідно цієї методики буде отримано залежності між вологовмістом матеріалу, що досліджується та вологістю повітря $u = f(\varphi)$ (ізотерми сорбції та десорбції).

Енергія зв'язку вологи з матеріалом визначалася за формулою

$$E = -RT \ln \varphi, \quad (4.9)$$

де R – універсальна газова постійна, $R = 848$ кг·м/моль·град;

T – абсолютна температура, °К;

φ - відносна вологість повітря в долях від одиниці.

Згідно цієї методики отримуються залежності між енергією зв'язку води та вологовмістом матеріалу, що досліджується $E = f(u)$.

Методика експериментальних досліджень по якій виконувалася програма досліджень по П.3 полягала у наступному. Основним завданням цієї методики є встановлення показників ефективності технологічних процесів переробки рицини

Показниками ефективності при переробці рицини будуть слугувати кількість (питома кількість) отриманої олії та її якість. Якість касторової олії повинна відповідати вимогам ГОСТ 6757-96 [7].

Таким чином, набір критеріїв для визначення оптимальних рівнів при віджиманні олії можна здійснити за допомогою сукупності наступних залежностей:

$$\mu_o \rightarrow \max ; \eta_\phi \rightarrow \min ; \lambda_o \leq \lambda_{o,зад}, \quad (4.10)$$

де μ_o - відносна кількість олії; η_ϕ - відносна кількість фузи; λ_o - якість олії;

$\lambda_{o,зад}$ - задана якість.

Відносна кількість олії визначається за формулою

$$\mu_o = \frac{m_o}{m_n},$$

де m_o - маса олії, що отримана із заданої маси рушанки рицини, гр.

m_n - задана маса рушанки рицини, гр

Відносна кількість фузи визначається за формулою

$$\eta_\phi = \frac{m_\phi}{m_n}$$

де m_ϕ - маса фузи, що отримана із заданої маси рушанки рицини, гр.

Під час віджимання олії доцільним є забезпечення максимально можливої її кількості. Окрім того, кількість фузи у вихідній суміші повинна бути мінімальною. Третім критерієм є дотримання припустимої якості олії.

Для проведення експериментальних досліджень згідно програми досліджень по П.3, використовували рицину сорту Хортицька 7. Сировина, що досліджується (рушанка) готується із насіння рицини у двох варіантах: із обрушеного насіння (без лущиння) та із необрушеного насіння.

Для обрушення насіння використовувався пристрій, технологічна схема якого представлена на рисунку 4.2а та загальний вигляд на рисунку 4.2б. Відділення лущиння з обрушеного насіння здійснювали на пневмосепараторі [13].

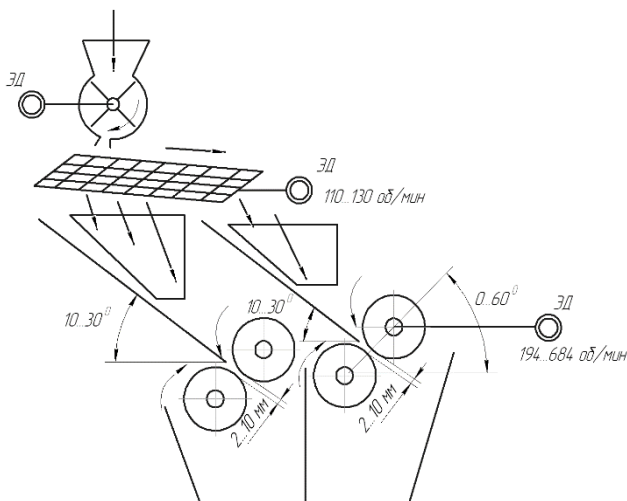


Рис. 4.2а. Технологічна схема процесу обрушення насіння рицини

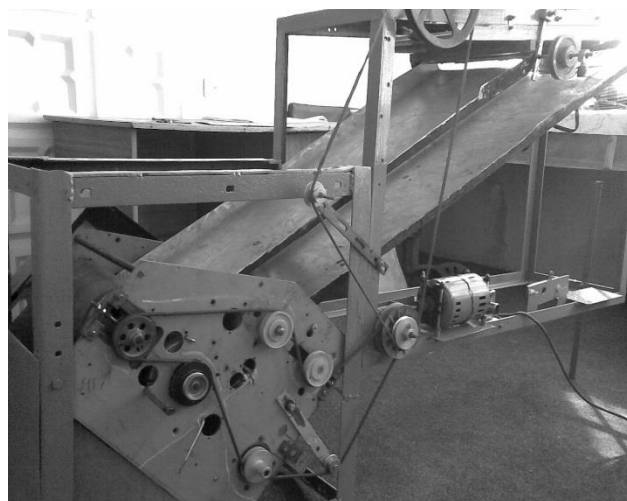


Рис. 4.2б. Загальний вигляд пристрою для обрушення насіння рицини

Подрібнення рицини у рушанку (з обрушеного або необрушеного насіння рицини) здійснювали на спеціальному однопарному вальцевому верстаті. Розмір між валками, що подрібнюють, встановлювали з урахуванням фізико-механічних характеристик насіння (довжини, ширини та товщини). Визначення цих характеристик проводили з використанням методик, що рекомендуються згідно з [6].

Перед проведенням експериментів визначали вихідну вологість рушанки за ГОСТ 5947-68 [5].

При цьому, масу води у матеріалі, що досліджується, визначали за (4.4). Вологість матеріалу по відношенню до загальної маси (у %) визначали за (4.5).

Визначення комплексних показників ефективності технологічних процесів переробки рицини виконані на експериментальній установці, технологічна та конструктивна схеми якої представлені відповідно на рисунку 4.3. Загальний вигляд представлений на рисунку 4.4.

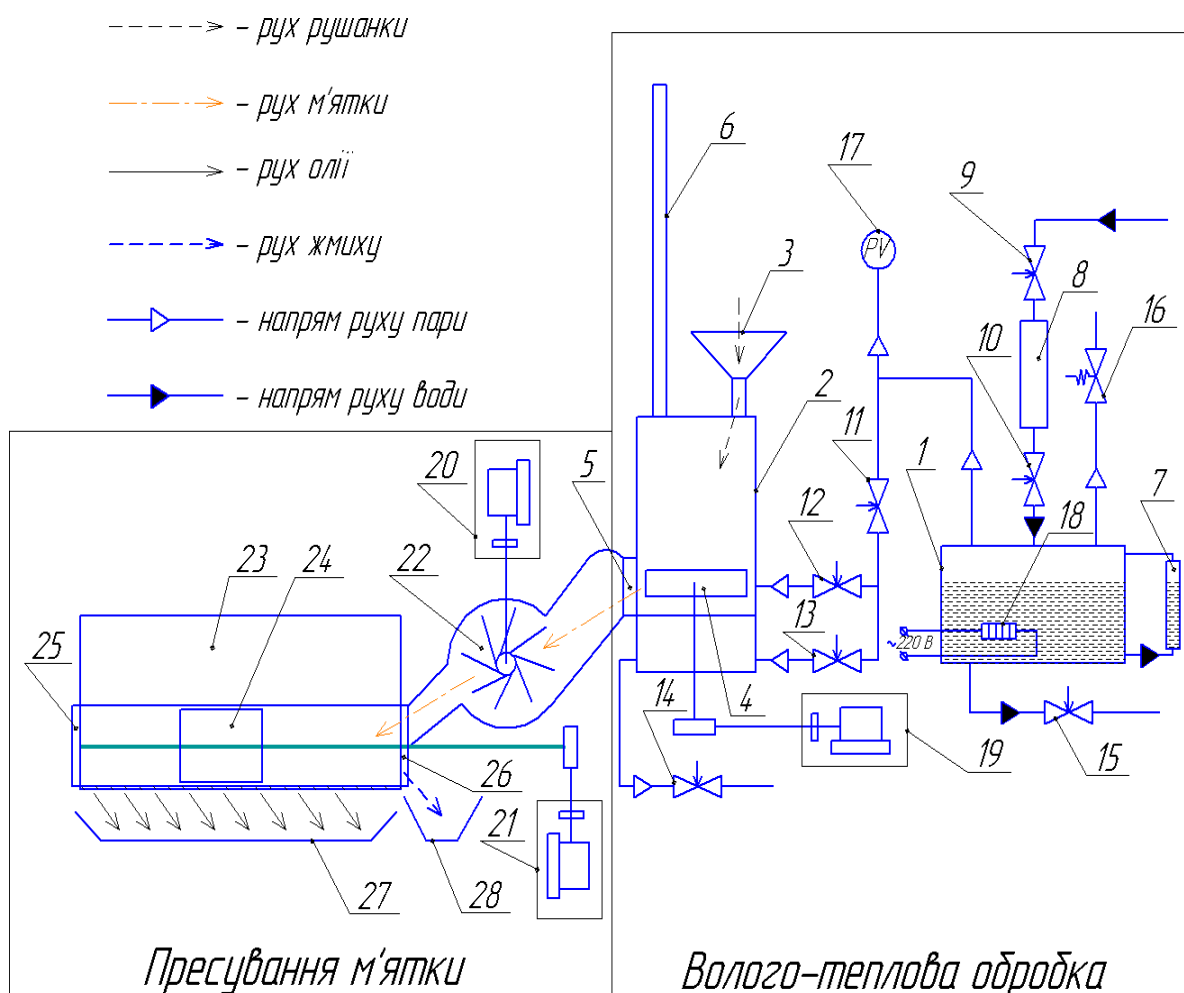


Рис. 4.3. Схема технологічного експериментального комплексу для віджимання олії з олійної сировини

1 – парогенератор; 2 – жаровня; 3 – завантажувальний бункер; 4 – мішалка; 5 – вивантажувальне вікно; 6 – труба для відведення парів; 7 – мірне скло парогенератору; 8 – додаткова ємність для води; 9-15 – прохідний регулюючий вентиль; 16 – зворотній клапан; 17 – манометр; 18 – нагрівальний елемент; 19-21 – електродвигун з редуктором; 22 – бітер; 23 – прес; 24 – поршень пресу; 25-26 – вставки каналу; 27 – ємність для збирання олії; 28 – ємність для збирання жмиху; 29 – нагрівальний елемент.

Жаріння (зволоження та сушіння) м'ятки насіння рицини відбувається у жаровні 2. Згідно технологічного процесу, вода до парогенератору 1 подається через відкритий прохідний регулюючий вентиль 9, додаткову ємність для води 8 та прохідний регулюючий вентиль 10. Контроль рівня води виконується за допомогою мірного скла 7. Після досягнення необхідного рівня, води у парогенераторі 1, вентиль 10 та 9 перекриваються. Нагрівання води відбувається за допомогою трьох нагрівальних елементів 18, що знаходяться у баку парогенератора. Тиск у парогенераторі 1 контролюється за допомогою манометра 17. Аварійний тиск контролюється за допомогою запобіжного клапана 16.



Рис. 4.4. Загальний вид експериментального комплексу для віджимання олії з олійної сировини

Рушанка насіння рицини подається до жаровні 2 через завантажувальний бункер 3. Контроль необхідного рівня рушанки забезпечується за допомогою мірної лінійки, що вставляється у завантажувальний бункер. Перемішування рушанки під час

жаріння виконується за допомогою мішалки 4, що приводиться в обертання електро-двигуном з редуктором 19. Пар під час жаріння відводиться через трубу для відведення пару 6. Зволоження м'ятки виконується гострою парою, що подається до чану жаровні 2 через відкритий вентиль 11 та 12. Вентиль 13 при цьому закритий. Причому, вентиль 12 відкритий повністю, а вентиль 11 – відкритий на таке положення, щоб тиск пари, залишався незмінним, який контролюється манометром 17. Сушіння м'ятки здійснюється глухою парою, що подається до нижньої частини жаровні через вентилі 11, 13 та 14. Для цього перекривається вентиль 12, що подає гостру пару, та відкриваються повністю вентилі 13 та 14.

Положення вентилю 11 – не змінюється для заданого значення тиску. Жаріння м'ятки закінчується вивантаженням матеріалу через вивантажувальне вікно 5. Вентиль 15 необхідний для зливання води з парогенератору.

Віджимання олії здійснюється у пресі (рисунок 4.3 – 4.4). Для цього, м'ятка через вивантажувальне вікно подається до бітера 22, який обертається електродвигуном з редуктором 20. В свою чергу, бітер 22, що обертається, заштовхує м'ятку до каналу преса 23 у необхідній кількості. При цьому, поршень 24 відведений в крайнє ліве положення. З метою підтримання постійної температури м'ятки після її жаріння, за допомогою нагрівального елемента 29 канал пресу попередньо нагрівається до температури 85...90 °С Після наповнення каналу преса 23, закривається вставка каналу 26, вмикається електродвигун з редуктором 21, що приводить поршень 24 у рух. Поршень 24, рухаючись вправо, здавлює м'ятку. Олія, що відходить при здавлюванні, через зерні пластини (знаходяться в нижній частині преса), попадає до ємності для збирання олії 27. Далі треба видалити з каналу преса 23 віджату мезгу. Знімають вставку 26, включають електродвигун з редуктором 21 для переміщення поршня 24. Відпрацьована мезга витискається поршнем і виходить в нижню частину бітера 22, яка має проріз для вивантаження.

При підготовці рушанки для жаріння, в жаровні визначальними параметрами є: тиск пари, p_{sp} , висота шару м'ятки H , початкова вологість м'ятки W_n , кінцева вологість

м'ятки окремо для періодів зволоження $W_{к.з}$ та сушіння $W_{к.с}$. Жаровня експериментальної установки має один чан, число обертів мішалки жаровні 4 не змінюється, та складає 32,5 об/хв.

В різних джерелах літератури, кінцева вологість при зволоженні та сушінні м'ятки рицини має суперечливий характер [9,10], тому, з метою проведення подальших досліджень з віджимання олії на пресі – прийняті максимальні значення з обов'язковим дослідженням декількох середніх значень. Тобто, кінцева вологість м'ятки для періоду зволоження контролювалася до рівня $W_{к.з}=15\%$, кінцева вологість м'ятки для періоду сушіння до рівня $W_{к.с}=6\%$.

Тиск пари, при дослідженнях прийнято $p_{сп} = 3, 4$ та 5 кг/см². Висота шару рушанки в жаровні може варіюватися від $H = 0$ мм до $H = 240$ мм. Проведення попередніх експериментів дозволило визначити параметри завантаження рушанки в жаровню. Так, для забезпечення необхідної кількості м'ятки, що подається до преса для віджимання касторової олії, достатня висота шару рушанки в жаровні складає 160 мм.

З метою отримання постійної кількості пари, необхідним є градування проходного регулюючого вентиля 11 (рисунок 4.3) на різний тиск. Для цього парогенератор заповнюють водою, вмикають всі нагрівальні елементи 18 та створюють тиск пари $p_{сп} = 5$ кг/см². Відкривають повністю вентилялі 13 та 14. А вентиль 11 – відкривають на таку відстань, щоб тиск пари, що контролюється по манометру 17, не змінювався. Коли це положення вентиля зафіксовано, - робиться риска. Такі ж risks градування робляться для значень тиску $p_{сп}=4$ кг/см² та $p_{сп}=3$ кг/см².

Для періоду зволоження м'ятки, необхідним є також визначення продуктивності парогенератора (кг пари / сек). Для цього, брали ємність з водою. Зважували її. Шлангу після вентиля 14, встановлювали в цю ємність з водою та ущільнювали. В парогенераторі створювали тиск пари $p_{сп} = 5$ кг/см². Повністю відкривали вентиль 13 та 14, а вентиль 11 – на необхідну риску. При цьому контролювали час, який складав 30 сек. По закінченні 30-ти сек., вентилялі 11, 13 та 14 закривали, а ємність з водою знову зважували.

Продуктивність парогенератора визначали як:

$$Q_{пг} = \frac{m_{\epsilon} - m_{\epsilon.n}}{t} \text{ кг} \cdot \text{с} \quad (4.11)$$

де m_{ϵ} - маса ємності з водою до проведення досліджень, гр.;

$m_{\epsilon.n}$ - маса ємності з водою та паром після проведення досліджень, гр.;

t - час, на протязі якого проводились дослідження, с.

Такі ж досліди проводили для значень тиску $p_{гп}=4 \text{ кг/см}^2$ та $p_{гп}=3 \text{ кг/см}^2$.

Для забезпечення висоти шару рушанки, що подається до жаровні, необхідним є градування баку жаровні. Для цього, мірною лінійкою через завантажувальний бункер 3 заміряли глибину баку жаровні та фіксували значення. Потім засипали рушанку в бак жаровні. Періодично, включали електродвигун з редуктором 19 та перемішували рушанку мішалкою 4. Рушанку засипали на стільки, щоб зміряне значення на лінійці зменшилося на 160 мм та ставили мітку на лінійці на рівні верхнього ободку завантажувального бункера.

З метою визначення кількості пари для зволоження рушанки насіння рицини до кінцевої вологості (15%), необхідним є визначення маси рушанки для відповідної висоти шару. Для цього, зважену рушанку засипали у жаровню. Одночасно контролювали висоту шару рушанки, що засипається. Для висоти шару 160 мм – фіксували її масу.

Кількість пари, що необхідна для зволоження рушанки до кінцевої вологості визначали за (4.6)

Час необхідний для зволоження рушанки до кінцевої вологості w_2 на заданому тиску пари $p_{гп}$, визначали як:

$$T = \frac{\Delta g_{вол}}{Q_{пг}}, \quad (4.12)$$

Різницю вологості, що отримана при зволоженні та сушінні м'ятки насіння рицини визначали за формулою

$$\Delta W = W_{к.з.} - W_{к.с.}, \quad (4.13)$$

Для виконання досліджень на експериментальній установці (рисунок 4.3 – 4.4) необхідно мати наступне обладнання та матеріали:

- термошафу;
- ваги з ціною шкали до третього знаку після коми;
- алюмінієві бюкси для навісок з матеріалом, що досліджується
- матеріал, що досліджується (рушанка рицини).

Алгоритм проведення експерименту наступний:

Зважити кожну пусту бюксу на вагах ціною поділки шкали 0,001 г.

Створити тиск пари в парогенераторі 1 рівним $p_{ep} = 5 \text{ кг/см}^2$, який контролюється манометром 17. При наявності більшого тиску пари за необхідний, його стравлюють. Для цього відкриваються вентилі 11, 13 та 14 (рисунок 4.3).

Засипати зважену рушанку в жаровню 2 до висоти шару 160 мм. Визначити за формулами (4.6) та (4.12) кількість пари та час, необхідний для зволоження рушанки до кінцевої вологості W_2 .

Увімкнути електродвигун з редуктором 19, що обертає мішалку 4 жаровні 2.

Для періоду зволоження вентиль 12 відкривали повністю та на відповідну риску – вентиль 11 (вентиль 13 – закритий). Через визначений за формулою (4.9) час, необхідний для зволоження рушанки до кінцевої вологості W_2 , відкривали заслінку вивантажувального вікна 5 та відбирали пробу рушанки у бюксу.

Для періоду сушіння, відкривали повністю вентиль 13, а вентиль 12 – закривали. Положення вентиля 11 не змінювали. Час сушіння до необхідної вологості визначали дослідним шляхом., так щоб кінцева вологість після сушіння була на рівні від 4% до 10%. При проведенні досліджень прийнято мінімальний час сушіння 25 хв. Інтервал часу при проведенні подальших досліджень складав 15 хв. Через даний проміжок часу (наприклад 25 хв) відкривали заслінку вивантажувального вікна 5 і відбирали пробу рушанки у бюксу.

Після періоду сушіння з відповідним часом, вмикався електродвигун з редуктором 20 приводу бітера 22, повністю відкривалося вивантажувальне вікно 5 і м'ятка

подавалася до попередньо підігрітого до 80-85 °С каналу преса 23. При повному заповненні каналу преса 23, електродвигун з редуктором 20 приводу бітера 22 вимикався. Канал закривався засувкою 26 та вмикався електродвигун з редуктором 21 приводу поршня 24 преса. Навантаження контролювали за амперметром, що встановлено в колі електродвигуна 21. Олію, що потрапила до ємності для збирання олії 27, вивантажували в бюксу. Кожну бюксу зважували. Вологість зразків визначали шляхом висушування їх до абсолютно сухої маси за методикою наведеною в ГОСТ 5947-68 [5]. При цьому, масу води у матеріалі, що досліджується, та вологість матеріалу по відношенню до загальної маси визначити за формулами (4.4) та (4.5).

Досліди 1 - 9 повторювали при тиску пари в парогенераторі 1 $p_{гр} = 4 \text{ кг/см}^2$ та $p_{гр} = 3 \text{ кг/см}^2$.

Ефективність процесу віджимання олії визначали з урахуванням критеріїв ефективності.

При проведенні досліджень, на експериментальній установці здійснювали незалежне варіювання наступних параметрів:

а) кількість рушанки, що подається до жаровні – за допомогою мірної відградуваної лінійки через завантажувальний бункер (поз. 2 і 3, рис. 4.3);

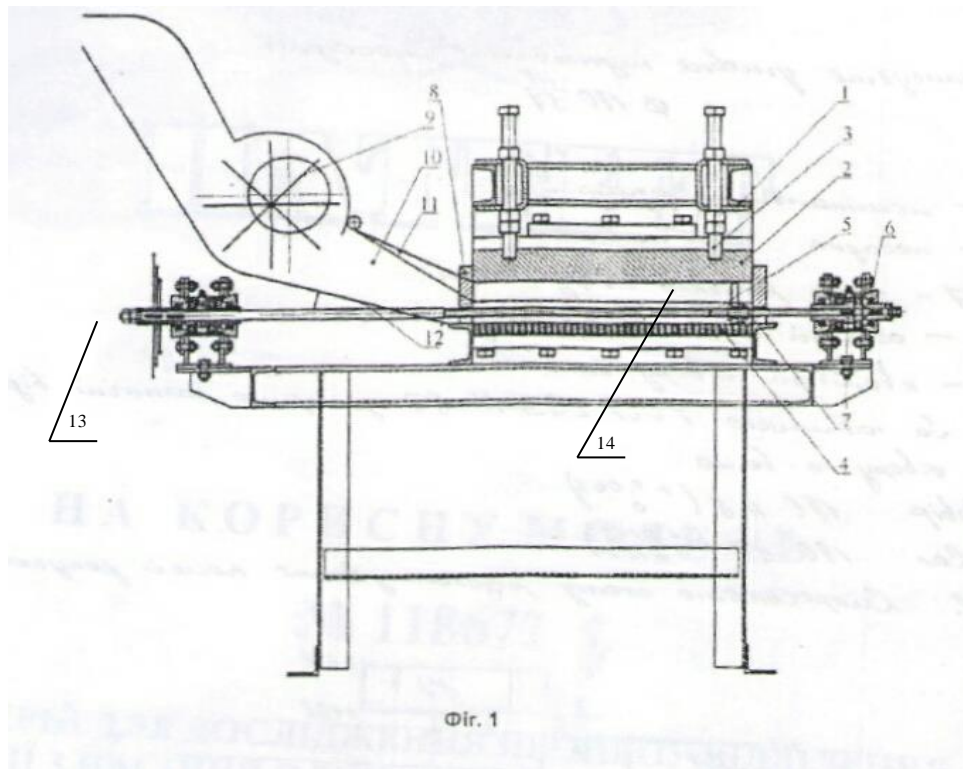
б) подачу пари, яка подається для зволоження рушанки насіння рицини – зміною положення відкриття засувки вентилів (поз.11 та 12, рис. 4.3);

в) подачу пари, яка подається для сушіння рушанки насіння рицини – зміною положення відкриття засувки вентилів (поз.11 та 13, рис. 4.3);

г) швидкості руху вала гвинтового механізму – зміною зірочок, що встановлені на валу (поз. 5 та 13, рис. 4.5);

д) висота каналу – регулюється за рахунок переміщення кришки каналу та має відповідно змінні по висоті поршні (поз. 2 та 14, рис. 4.5);

е) зазор та кут нахилу грані зеєрної планки – забезпечується заміною зеєрної планки (поз. 4, рис. 4.5).



1 – станина; 2 – кришка каналу; 3 – регулювальні болти; 4 – зерна планка; 5 – вал гвинтового механізму; 6 – опора валу; 7 – трапецеїдальна гайка; 8 – змінна вставка каналу; 9 – ексцентриковий бітер; 10, 14 – канал; 11 – рухлива кришка каналу; 12 – змінні вставка каналу; 13 – змінні зірочки; 14 – змінний поршень

Рис. 4.5. Загальний вигляд розгорнутого каналу [11]



Рис. 4.6. 3D зображення лабораторної установки

1 – зерна камера; 2 – ємність; 3 – основа; 4 – штовхач; 5 – плита; 6 – спрямовуюча; 7 – фланець; 8 – траверса; 9 – балка; 10 – кришка

Методика експериментальних досліджень по якій виконувалася програма досліджень по П.4 полягала у наступному: виготовлена мезга, що отримана при експериментах, засипається в зерну камеру і за допомогою штовхача 4 (рисунок 4.6), до якого прикладаються зусилля, створюється осьова деформація, що викликає об'ємні напруження. Натуральний зразок зерної камери наведений на рисунку 4.7.

Плита 5 (рисунок 4.6) зерної камери являється пристроєм для виміру внутрішнього тиску (рисунок 4.8), в яку встановлюється тензо-балка з тензо-датчиками (рисунок 4.9).

При підготовці до проведення експериментів була проведена тарировка датчиків за існуючою методикою. За отриманими даними був побудований графік залежності деформації тензобалки від навантаження (рисунок 4.9).

Приготовлена за режимами наведеними при плануванні експерименту мезга закладається в попередньо підігріту до температури 80-85 °С зерну камеру (рис. 4.6). Зерну камеру встановлюємо під прес, шток встановлюємо в зер. За допомогою преса (рис. 4.6) через шток зерної камери виконуємо одноосьове стискання мезги за встановленим раніше режимом стискання.



Рис. 4.7. Зерна камера лабораторного пресу

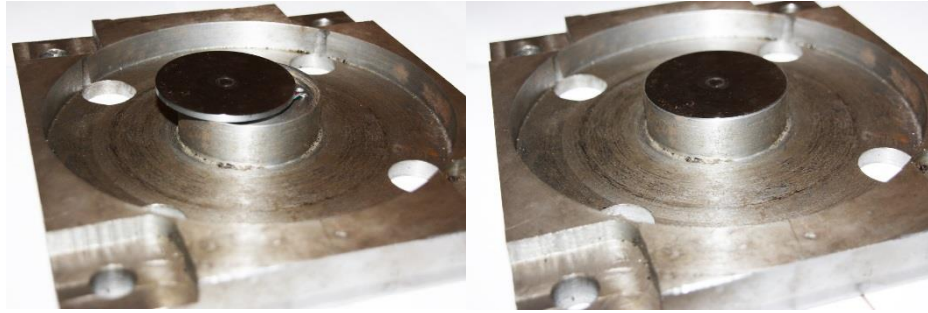


Рис. 4.8. Плита виміру внутрішнього тиску зерної камери



Рис.4.9. Тензо-балка з тензо-датчиками

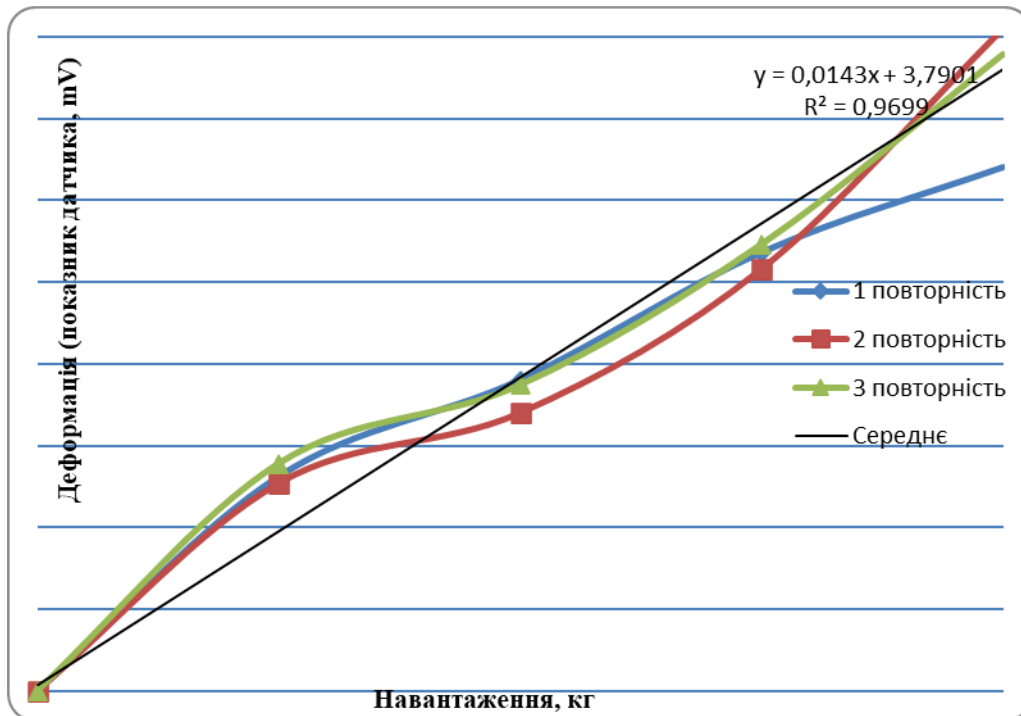


Рис. 4.10. Тарировочний графік тензоблока

Методика експериментального визначення закону стиснення мезги насіння ріпички. Для моделювання закону ступеня стиснення мезги в шнековому пресі поперечно визначається фактичний ступінь стиснення на прессуючому витку шнека за наведеною методикою. Отримані результати приймаємо за вихідні дані для подальших досліджень. При моделюванні ступеня стиснення в k -му витку преса в зерному циліндрі лабораторної установки необхідно опускати поршень, забезпечуючи висоту стиснутої мезги

$$h_k = h_1 \varepsilon_k \quad (4.14)$$

де h_k – висота стиснутої мезги для ступеня стиснення, що визначається;

h_1 – висота вихідного шару мезги в зерній камері лабораторного пресу;

ε_k – заданий ступінь стиснення для k -го досліда або k -го витка.

Вимірювання висоти стиснутої мезги проводиться лінійкою. Тиск, що створюється поршнем в мезгі в осьовому напрямку, вимірюється за допомогою тензодатчика, виконаного у вигляді пластини (рис. 4.9). Кожен дослід проводиться в триразовій повторності.

При стисненні тіла в замкнутому просторі силою, спрямованої нормально до поверхні тіла, що стискується, буде створюватися також радіальний тиск

$$P_r = \xi P_n, \quad (4.15)$$

де P_n – нормальний тиск, МПа;

ξ – коефіцієнт бокового тиску:

$$\xi = \frac{\mu}{1 - \mu}, \quad (4.16)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона; для порошкоподібних матеріалів, $\mu = 0,28 \div 0,32$.

Для мезги взяли середнє значення коефіцієнта Пуассона рівним 0,3; тоді коефіцієнт бокового тиску

$$\xi = \frac{0,3}{1-0,3} = 0,428. \quad (4.17)$$

Частота обертання шнекового вала преса, а значить, час стиснення (експозиція) мезги в кожному шнечку і фільтрація масла через шар мезги моделюється часом витримки поршня лабораторної установки. Для моделювання часу витримки в лабораторних дослідженнях приймаємо діапазон частоти обертання шнекового вала преса від 12 до 24 об/хв, з кроком 3 об/хв. Час витримки при кожному ступені стиснення визначається з виразу

$$t = 60/n \quad (4.18)$$

де 60 – кількість секунд у хвилині;

n – частота обертання шнекового вала об/хв;

t – час витримки поршня при кожному ступеню стиснення в секундах.

Діапазон частот обертання шнека і відповідний час витримки наведено у таблиці 4.1

Таблиця 4.1

Діапазон частот обертання шнека (об/хв) і відповідний час витримки (t)

Частота обертання вала, об/хв	12	15	18	21	24
Час витримки на кожному ступеню, с	5	4	3,3	2,8	2,5

Так, у першій серії дослідів при моделюванні частоти обертання 18 об/хв, час витримки повинний дорівнювати 3,3 с.

За результатами досліджень будуються графіки і визначаються залежності напруги від ступеню стиснення і ступіню стиснення від напруги:

$$\begin{aligned} \sigma &= f_1(\varepsilon_v); \\ \varepsilon_v &= \psi_1(\sigma). \end{aligned} \quad (4.19)$$

Методика експериментального визначення залежності коефіцієнтів пористості від напруги при різних експозиціях. При розгляді ущільнення «скелета» матеріала, що оброблюється, нарощення повзучих деформацій доцільно описати залежністю, що характеризує зміну коефіцієнта пористості матеріалу від питомого тиску.

Коефіцієнт пористості визначається як відношення об'єму пор до об'єму твердої фази («скелету») матеріалу (мезги)

$$\varepsilon = \frac{V_{\Pi}}{V_T}, \quad (4.20)$$

де V_{Π} , V_T – відповідно об'єм пор і об'єм твердої фази.

Якщо прийняти, що об'єм твердої фази мезги V_T дорівнює обсягу мезги після виходу з останнього витка преса V_n , тобто $V_n = V_T$, то об'єм пор $V_{\Pi} = V_1 - V_n$. Причому об'єм пор $V_{\Pi} = V_M + V_B$, де V_B – обсяг вільного повітря, сполученого з атмосферою, можливо частина з нього защемлена, тобто не пов'язана з атмосферою. V_M – об'єм, що зайнятий олією, що заповнює пори «скелета».

Таким чином, залежність коефіцієнта пористості від питомого тиску визначається за даними результатів експериментів при дослідженні закону зміну ступеня стиснення від питомих тисків. Коефіцієнт пористості визначається з виразу (4.20). Для більш точного визначення об'єму твердої фази необхідно провести спеціальний дослід при максимально можливому ступеню стиснення в умовах лабораторного обладнання. Отриманий при цьому обсяг віджатої мезги приймаємо за об'єм твердої фази V_T . Тоді обсяг часу визначається із залежності $V_n = V_k - V_T$.

За результатами обробки експериментальних даних будуються графіки та визначаються наступні аналітичні залежності:

$$\sigma = f_2(\varepsilon); \quad \varepsilon = \psi_2(\sigma). \quad (4.21)$$

Для вибору оптимального закону стиснення тривають дослід з часом витримки кожному ступеню стиснення згідно з таблицею 4.1. При проведенні дослідів змінюються напруги і робиться відбір олії при кожній ступені стиснення. По відібраним

навіскам олії відповідно до виразу (3.4) визначаються коефіцієнти олієвіддачі k_M для кожного ступеня віджимання. За результатами вимірювань будують графіки з різними параметрами t

$$\sigma = \varphi_1(\varepsilon_v), \quad k_M = \varphi_2(\varepsilon_v). \quad (4.21)$$

По плавності кривої фільтрації олії робиться висновок про правильність підбору ступеня стиснення кожного шнечка. За сумарним виходом олії вибирається найкращий варіант часу витримки кожному ступеню стиснення.

Методика визначення коефіцієнтів фільтрації. Коефіцієнти фільтрації визначаються при ступені стиснення, що моделює роботу кожного витка преса, і часу витримки, що моделює частоту обертання шнекового вала. При кожному ступеню стиснення відбираємо віджату олію, визначаємо його вагу і об'єм в см^3 . За обсягом відфільтрованої олії, часу витримки при кожному ступеню стиснення і площі фільтрації визначаємо швидкість фільтрації олії

$$u = \frac{V_M}{\omega t}, \quad (4.22)$$

де V_M – об'єм навіски олії, см^3 ;

t – час витримки при кожному ступеню стиснення (с), що визначається за формулою (4.19);

$\omega = \pi D h$ – площа фільтрації олії через мезгу в зерній камері, см^2 ;

D – внутрішній діаметр зєєра, см;

h – висота стисненої мезги (см) в зерному циліндрі при ступеню стиснення, що вимірюється;

u – швидкість фільтрації (см/с) при ступеню стиснення, що вимірюється;

За законом Дарсі швидкість фільтрації олії через шар мезги по радіусу зерного циліндра можна виразити формулою

$$u = -k \frac{P_1 - P_2}{\gamma r}; \quad (4.23)$$

Звідси коефіцієнт фільтрації дорівнює

$$k = -\frac{u\gamma}{p_1 - p_2}, \quad (4.24)$$

де γ – питома вага порової рідини (олії);

p_1 – гідродинамічний тиск в поровій рідині по вісі зерного циліндра;

p_2 – гідродинамічний тиск в поровій рідині на виході із зерного циліндра.

Приймаємо тиск $p_2 = 0$.

Вважаючи $p_1 - p_2 = 1$, знаходимо, що $u = -k$. Звідси видно, що коефіцієнт фільтрації чисельно дорівнює величині швидкості фільтрації при градієнті напору, що дорівнює одиниці. Коефіцієнт фільтрації залежить від характеру фільтруючої рідини

$$k = k_0 \frac{g}{\nu}, \quad (4.25)$$

де ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини;

g – прискорення сили тяжіння;

k_0 – проникність матеріалу (мезги), що характеризується тільки його геометричними властивостями, що не залежить від характеру фільтруючої рідини.

Так як гідродинамічний тиск в поровій рідині ми заміряти не можемо, приймаємо $p_1 = \sigma_r$. Тому замість коефіцієнтів фільтрації ми визначаємо фіктивні коефіцієнти фільтрації.

На підставі отриманих даних будують графіки залежності коефіцієнтів фільтрації від ступеня стиснення при різному часі стиснення згідно з табл. 4.1.

Методика експериментальної перевірки адекватності математичних моделей процесів віджимання і фільтрації касторової олії. Розроблена математична модель процесу фільтрації олії через шар мезги в шнековому пресі. Обробка отриманих експериментальних даних дозволить отримати рівняння, яке описує залежність питомого тиску від ступеня стиснення, а також рівняння зміни коефіцієнта пористості мезги в

залежності від питомого тиску. Цими рівняннями замикається вихідна система диференціальних рівнянь, яка дає можливість визначити шукане рівняння консолідації мезги. Користуючись цією методикою, отримаємо залежності радіальних коефіцієнтів фільтрації масла через шар мезги при різному ступеню стиснення і тиску.

За результатами розрахунків ступеню стиснення на витках преса ФП в залежності від ширини вихідної щілини преса, визначаються радіальні коефіцієнти фільтрації і питомий тиск в мезгі робочої зони кожного витка преса. Значення коефіцієнтів фільтрації і питомого тиску підставляються в рівняння консолідації мезги. Вирішуючи рівняння консолідації мезги методом кінцевих елементів, отримаємо розподіл гідродинамічного тиску олії по довжині шнекового вала і по радіусу зеєра. За даними гідродинамічного тиску порової олії і використовуючи метод кінцевих різниць при вирішенні рівняння фільтрації, отримаємо чисельні значення залежностей, що характеризують процес фільтрації касторової олії через шар мезги в шнековому пресі. Експериментальна залежність процесу фільтрації олії по довжині зеєра в шнековому пресі визначається на основі лабораторних досліджень наступним чином. Визначаємо кількість масла у вихідній мезге, закладеної в зеєр лабораторного преса

$$g_{\text{мас}} = M \cdot g_{\text{мез}}, \quad (4.26)$$

де $g_{\text{мас}}$, $g_{\text{мез}}$ – відповідно початкова кількість олії і мезги в зеєрі лабораторного преса;

M – олійність мезги у відносних одиницях.

Розглянемо результати досліджень фільтрації на лабораторному пресі при моделюванні закону стиснення преса ФП. У цих дослідах кожна точка залежності процесу фільтрації проведена при ступені стиснення відповідного витка шнекового вала при вибраній ширині вихідної щілини преса. Відносна кількість олії при кожному із заданих ступенів стиснення, тобто при кожному витку шнека визначається за наступними залежностями

$$f_{L1} = g_{m1}/g_m, f_{L2} = g_{m2}/g_m \dots f_{Ln} = g_{mn}/g_m, \quad (4.27)$$

де f_{Ln} , g_{mn} – кількість відфільтрованої олії відповідно у відносних одиницях і в грамах в n -му витку преса.

Тоді кількість олії, виділеної з мезги в кожному витку преса визначиться за формулами

$$G_{m,1} = f_1 \cdot G_m; G_{m,2} = f_2 \cdot G_m; \dots G_{m,n} = f_n \cdot G_m; \quad (4.28)$$

де $G_{m,n}$ – кількість олії, виділеної з мезги в n -му витку шнекового преса;

G_m , $G_{mез}$ – кількість олії у вихідній мезгі і кількість вихідної мезги;

$$G_m = M \cdot G_{mез}. \quad (4.29)$$

Залежність олійності мезги по довжині шнекового валу визначається за формулою олійності мезги k -ом витку

$$M_k = \frac{G_m - \sum_{i=1}^{i=k} G_{m,i}}{G_{mез} - \sum_{i=1}^{i=k} G_{m,i}}, \quad (4.30)$$

Для експериментальних досліджень використовувалися прилади та обладнання з наступними характеристиками.

Для приводу мішалки 4 (рисунок 4.1) використовувався електродвигун потужністю 0,55 кВт та редуктор з передаточним числом 20. Для приводу бітера 22 використовувався електродвигун потужністю 0,2 кВт та редуктор з передаточним числом 30. Для приводу поршня преса 23 використовувався електродвигун потужністю 0,37 кВт та редуктор з передаточним числом 7,5.

Для зважування навісок м'ятки олійної сировини використовували алюмінієві бюкси та ваги типу LCD, похибка яких складає ± 1 мг та ціна поділки – 0,001 г.

Для контролювання тиску у парогенераторі 1 (рис. 4.2) використовувався диференційний манометр типу ДМ 05100 за ГОСТ 2405-88, клас точності якого складає 1,5 та ціна поділки – 0,02 мПа.

Для контролювання та фіксування ступеню стиснення олійної сировини у пресі 23 (рис.4.2) використовували амперметр змінного струму з максимальним виміром струму 5 А, клас точності якого складає 0,5 та ціна поділки – 0,2 А.

Для визначення маси сухої речовини матеріалу навісок, що досліджуються, згідно ГОСТ 5947-68, використовувалася сушильна електрична шафа типу 2В-151 з діапазоном температур від 40 до 200 °С. Межа відхилення температури шафи у її встановленому режимі складає $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Для регулювання подачі тиску в жаровню використовувалася система парових кранів типу DN15-50. Паровий кран (позиція 12 на рис.4.2) забезпечує подачу пару безпосередньо у жаровню. За його допомогою відбувається зволоження рушанки олійної сировини. Паровий кран (позиція 13 на рис. 4.2) забезпечує подачу пару до нижньої частини жаровні. За його допомогою відбувається сушіння рушанки олійної сировини. Паровий кран (позиція 11 на рис. 4.2) забезпечує подачу пару безпосередньо до жаровні та її нижньої частини. Час, необхідний для зволоження та сушіння рушанки заміряли секундоміром СІ-2А, з похибкою не більше 0,25 с.

Для подрібнення насіння рицини у рушанку використовувалися ручні валки. При використанні насіння рицини з різними розмірними характеристиками, ручні валки мають можливість регулювання робочого зазору між ними.

4.2. Результати експериментальних досліджень

4.2.1. Результати експериментальних досліджень термодинамічних характеристик насіння рицини

Виконуючи досліди при різних початкових вологовмістах ядра, лушпиння, рушанки рицини та при 10%-му вмісті лушпиння в ядрі рицини, отримано залежності (рисунок 4.11) між вологовмістом матеріалу, що досліджується і потенціалом масопереносу $u=f(\theta)$ при постійній температурі $T=const$.

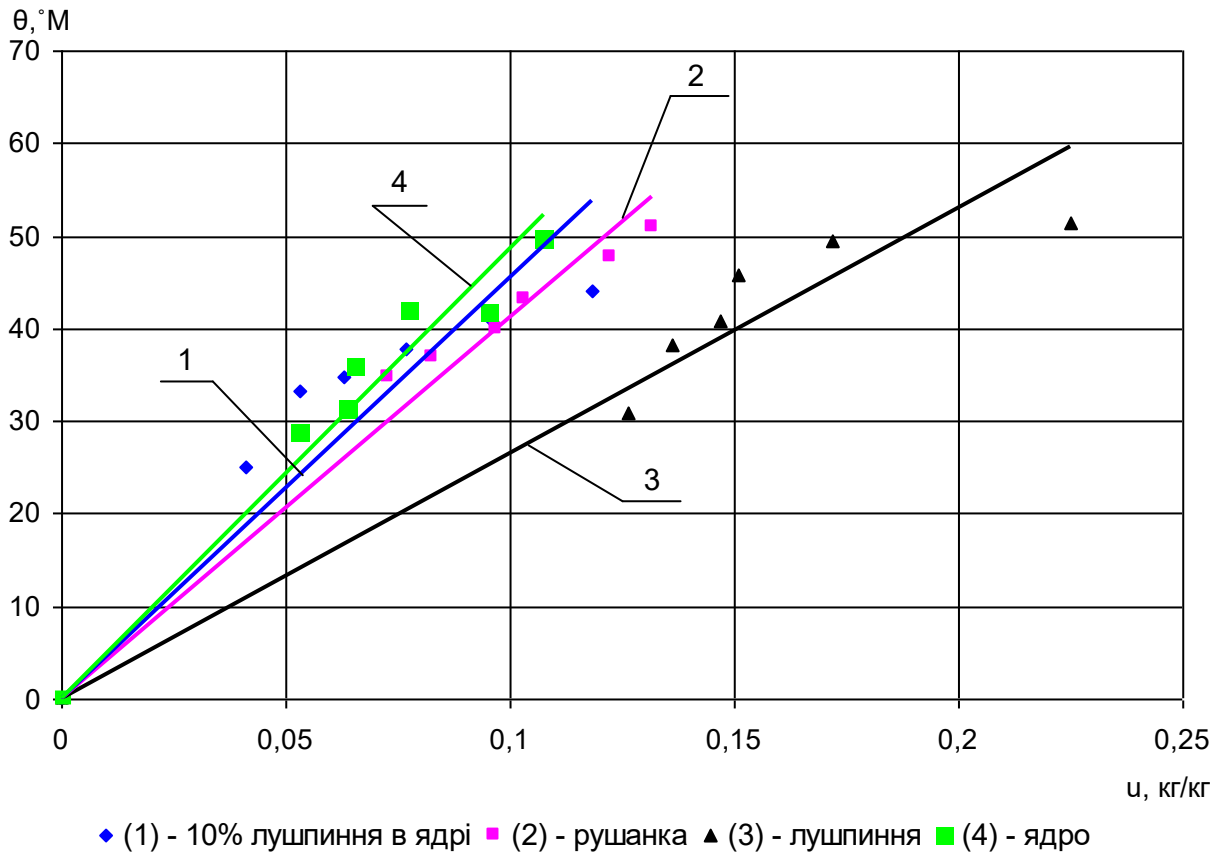


Рис. 4.11. Залежності потенціалу масопереносу елементів насіння рицини від їх вологовмісту.

Рівняння регресії залежностей наведених на графіках рис.4.10 мають вигляд:

- для ядра

$$\theta_{\text{я}} = 486,36 \cdot u_{\text{я}}, \quad (4.31)$$

- для рушанки

$$\theta_{\text{р}} = 411,19 \cdot u_{\text{р}}, \quad (4.32)$$

- для лушпиння

$$\theta_{\text{л}} = 265 \cdot u_{\text{л}}, \quad (4.33)$$

- для 10 %-вого вмісту лушпиння в ядрі рицини

$$\theta_{\text{р}\%} = 454,38 \cdot u_{\text{р}\%}, \quad (4.34)$$

Залежності питомої ізотермічної масоємкості (визначені за формулою 4.8) від вологовмісту елементів насіння рицини представлені на рисунку 4.12.

Рівняння регресії залежностей питомих ізотермічних масоємкостей ядра $c_{т.я}$, рушанки $c_{т.р}$, лушпиння $c_{т.л}$, 10%-му вмісту лушпиння в ядрі $c_{т.р\%}$ відповідно мають вигляд:

- для ядра

$$c_{т.я} = 10^{-17} \cdot u_{я} + 0,002, \quad (4.35)$$

- для рушанки

$$c_{р} = 2 \cdot 10^{-17} \cdot u_{р} + 0,0024, \quad (4.36)$$

- для лушпиння

$$c_{т.л} = 2 \cdot 10^{-17} \cdot u_{л} + 0,0038, \quad (4.37)$$

- для 10 %-вого вмісту лушпиння в ядрі рицини

$$c_{р\%} = 2 \cdot 10^{-17} \cdot u_{р\%} + 0,0021, \quad (4.38)$$

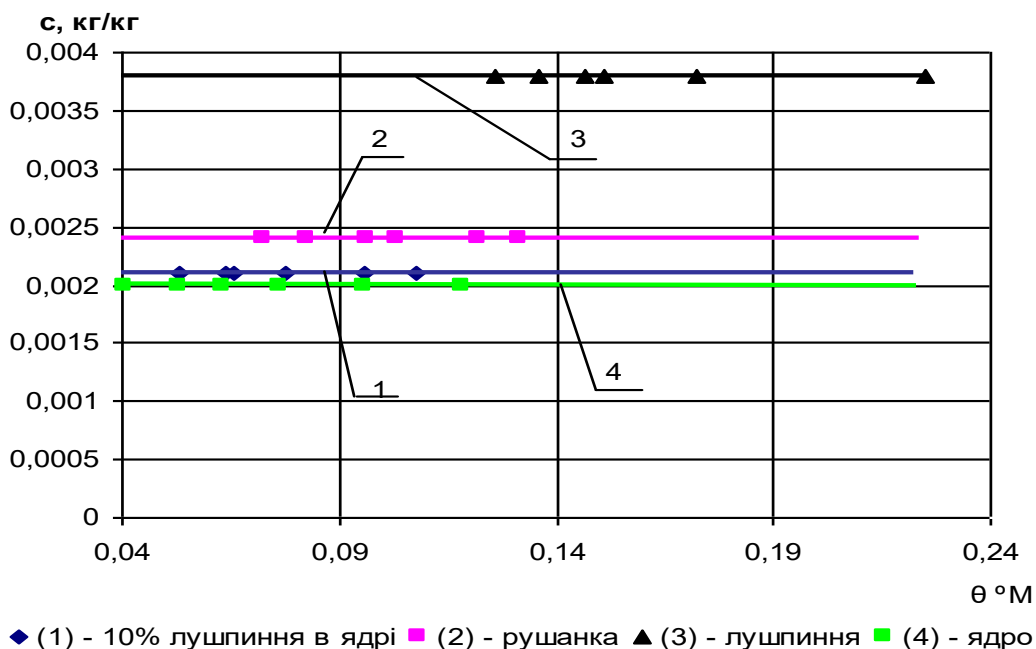


Рис. 4.12. Залежності питомої ізотермічної масоємкості від вологовмісту елементів насіння рицини

Аналізом залежностей встановлено (рисунок 4.10), що при збільшенні ядриці в продукті що досліджується, потенціал масопереносу (при однаковому вологовмісту тіла, що досліджується) буде збільшуватися. Відповідно із збільшенням потенціалу масопереносу буде зменшуватися час, що витрачається на всмоктування вологи або її віддачі іншому тілу [6]. Такі процеси відбуваються під час волого-теплової обробки насіння рицини. Отриманні залежності використані при розробці і чисельних дослідженнях математичних моделей процесу жаріння олійної сировини.

4.2.2. Результати експериментальних досліджень ізотерм сорбції визначення енергії зв'язку вологи з елементами насіння рицини

Виконуючи досліди при різних концентраціях сіркової кислоти, що створює відповідну вологість навколишнього повітря, отримано залежності (рис. 4.13) між вологовмістом матеріалу, що досліджується (ядро та лушпиння) і вологістю повітря $u=f(\varphi)$ при постійній температурі $T=20^{\circ}\text{C}$.

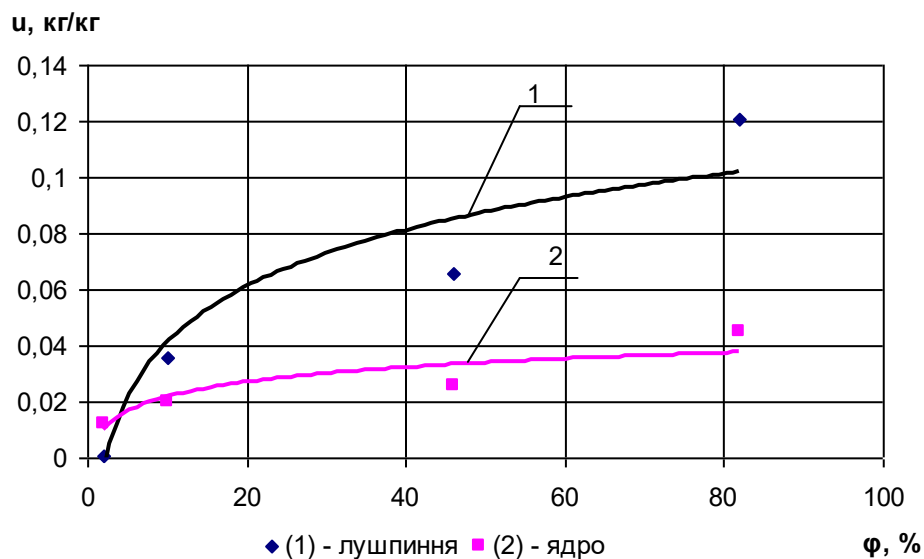


Рис. 4.13. Ізотерми сорбції (десорбції) елементів насіння рицини

Рівняння регресії залежностей наведених на графіках рис.4.13. мають вигляд:

- для ядра

$$u_{\text{я}} = -5 \cdot 10^{-6} \cdot \varphi^2 + 0,0009\varphi, \quad (4.39)$$

- для лушпиння

$$u_n = -4 \cdot 10^{-6} \cdot \varphi^2 + 0,0018\varphi, \quad (4.40)$$

Аналізом залежностей встановлено, що зі збільшенням вологості повітря збільшується вологовміст ядра та лушпиння насіння рицини. Але, при однаковій вологості повітря вологовміст буде більший у лушпинні. Таким чином, якщо при однаковому тиску пари, що подається для зволоження рушанки, час необхідний для її зволоження до відповідної вологості при процесі жаріння буде менший в тій рушанці, де лушпиння буде більше.

Виконуючи досліди при різних концентраціях сіркової кислоти визначено енергію, що витрачається на відрив 1 моля води для даного вологовмісту ядра або лушпиння при постійній температурі $T=20^{\circ}\text{C}$ (рисунок 4.14)

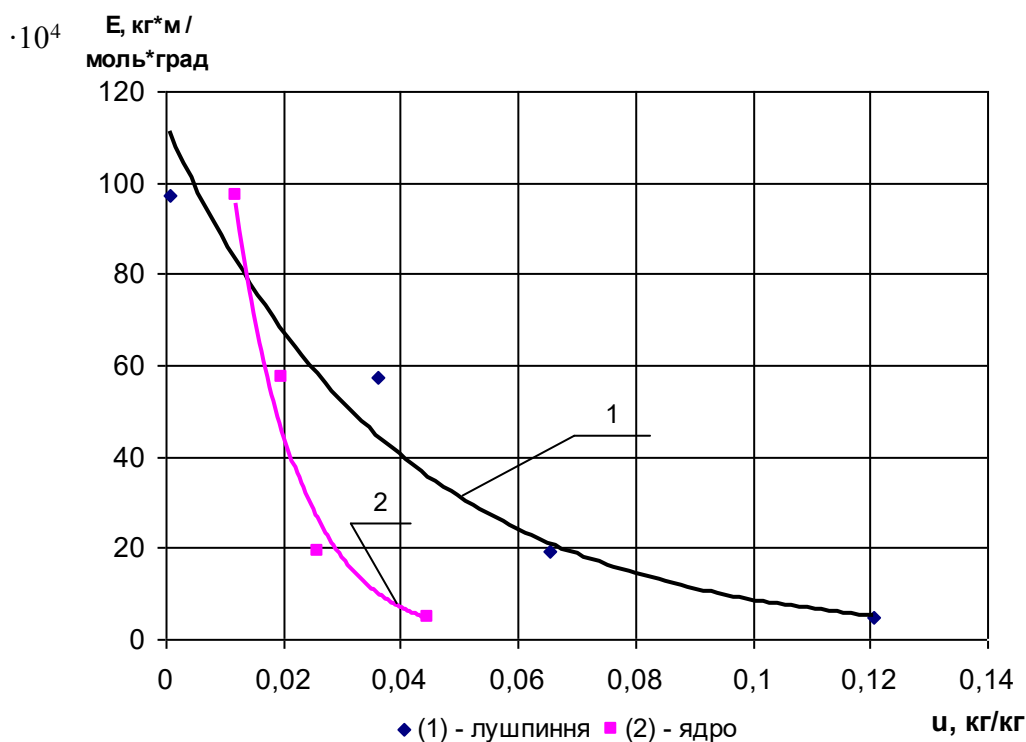


Рис. 4.14. Залежність енергії зв'язку води елементів насіння рицини від їх вологовмісту

Рівняння регресії залежностей рис 4.13 мають вигляд

- для ядра

$$E_{\text{я}} = 112,81 \cdot e^{-25,71u}, \quad (4.41)$$

- для лушпиння

$$E_{\text{л}} = 290,54 \cdot e^{-92,949u} \quad (4.42)$$

Аналізом залежностей встановлено, що енергія на відрив 1 моля води витрачається тим більше, чим менший вологовміст в ядрі та лушпинні рицини. Причому, при однаковому вологовмісті в елементах насіння рицини, більше витрачається енергії на відрив 1 моля води у лушпинні. Таким чином, чим більше в рушанці рицини буде присутнє лушпиння, тим більше необхідно енергії на відрив 1 молю води і тим менший час буде затрачений на сушіння під час процесу жаріння, так як під час витрати енергії виділяється теплота, яка також витрачається на сушіння олійної сировини [12].

4.2.3. Результати експериментальних досліджень ефективності технологічних процесів переробки рицини

В результаті проведення експериментальних досліджень отримані залежності відносної кількості олії і фузи від кінцевої вологості мезги після процесу її сушіння $\mu_o=f(W_{\text{к.с.}})$, $\eta_{\text{ф}}=f(W_{\text{к.с.}})$ (рис. 4.15) при зволоженні м'ятки до $W_{\text{к.с.}}=11\%$ та тиску пари, що гріє $p_{\text{сп}}=0,3\text{МПа}$, $p_{\text{сп}}=0,4\text{МПа}$ та $p_{\text{сп}}=0,5\text{МПа}$.

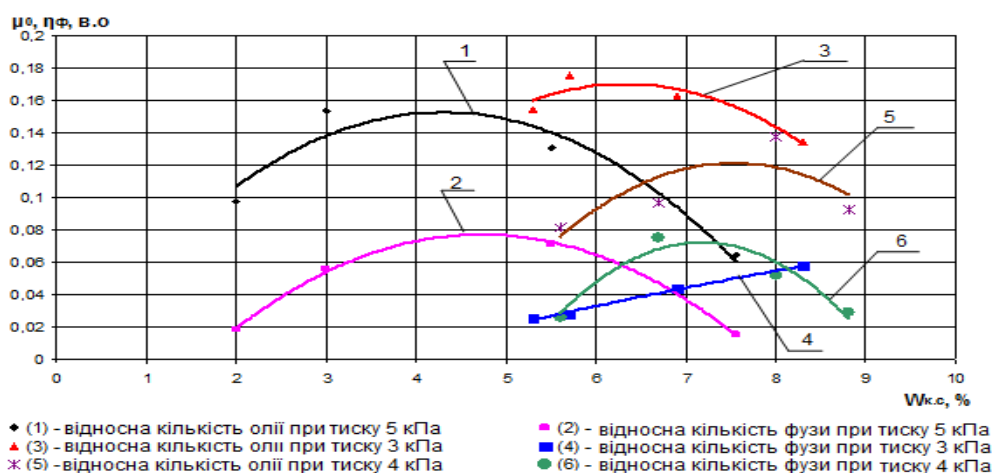


Рис. 4.15. Залежність відносної кількості олії і фузи від кінцевої вологості мезги після процесу її сушіння при $W_{\text{к.с.}}=11\%$; $p_{\text{сп}}=0,3\text{МПа}$, $p_{\text{сп}}=0,4\text{МПа}$ та $p_{\text{сп}}=0,5\text{МПа}$.

Рівняння регресії залежностей наведених на рис. 4.15 мають вигляд:

- для відносної кількості олії при тиску пари, що гріє, 0,3 МПа:

$$\mu_0 = -0,0095 \cdot W_{к.с.}^2 + 0,1202 \cdot W_{к.с.} - 0,2098 \text{ при } R^2=0,9986, \quad (4.43)$$

- для відносної кількості олії при тиску пари, що гріє, 0,4 МПа:

$$\mu_0 = -0,0122 \cdot W_{к.с.}^2 + 0,1835 \cdot W_{к.с.} - 0,5695 \text{ при } R^2=0,9828, \quad (4.44)$$

- для відносної кількості олії при тиску пари, що гріє, 0,5 МПа:

$$\mu_0 = -0,0087 \cdot W_{к.с.}^2 + 0,0749 \cdot W_{к.с.} - 0,0081 \text{ при } R^2=0,9919, \quad (4.45)$$

- для відносної кількості фузи при тиску пари, що гріє, 0,3 МПа:

$$\eta_\phi = -0,0005 \cdot W_{к.с.}^2 + 0,018 \cdot W_{к.с.} - 0,0573 \text{ при } R^2=0,9996, \quad (4.46)$$

- для відносної кількості фузи при тиску пари, що гріє, 0,4 МПа:

$$\eta_\phi = -0,0177 \cdot W_{к.с.}^2 + 0,2544 \cdot W_{к.с.} - 0,8402 \text{ при } R^2=0,9851, \quad (4.47)$$

- для відносної кількості фузи при тиску пари, що гріє, 0,5 МПа:

$$\eta_\phi = -0,0078 \cdot W_{к.с.}^2 + 0,0738 \cdot W_{к.с.} - 0,0974 \text{ при } R^2=0,9993, \quad (4.48)$$

Як видно (рис. 4.15), всі залежності для відносної кількості олії при тиску пари, що гріє $p_{зр}=0,3$ МПа, $p_{зр}=0,4$ МПа та $p_{зр}=0,5$ МПа мають максимальні значення, відповідні величинам вологості $W_{к.с.} = 6,25\%$, $W_{к.с.} = 7,5\%$ та $W_{к.с.} = 4,2\%$. При зниженні або збільшенні вологості від цих значень спостерігається зменшення отриманої відносної

кількості олії при всіх тисках. Пов'язано це з тим, що зі збільшенням вологості мезги, вона стає дуже пластичною, і тому, при пресуванні частина мезги, проходить разом з олією через зерні пластини преса, а частина мезги продавлюється через мікрощілини, що існують між поршнем і каналом в іншу його частину. Це призводить до зменшення виходу чистої олії. Але, зі зниженням вологості від оптимального значення, мезга, що отримується починає розсипатися. Відповідно, це призводить також до зниження виходу олії і підвищеної її олійності. При оптимальній кінцевій вологості, мезга отримує певні пружні властивості. Це допоможе уникнути потрапляння в загальну вихідну масу частинок мезги (фузи) і продавлювання її через мікрощілини, що існують між поршнем і каналом.

При тиску пари, що гріє $p_{ep}=0,3$ МПа, де витрата парогенератора становить $0,194$ кг / хв, отримано найбільшу кількість олії і найменшу кількість фузи. При цьому відносна кількість олії становить $\mu_o = 0,17$, відносна кількість фузи – $\eta_\phi=0,06$. При тиску пари, що гріє $p_{ep}=0,4$ МПа та $p_{ep}=0,5$ МПа (витрата парогенератора складає $Q=0,156$ кг/хв и $Q=0,114$ кг/хв), отримано відповідно $\mu_o=0,12$ та $\mu_o=0,15$ (при цьому $\eta_\phi=0,07$ та $\eta_\phi=0,075$). Пояснюється це тим, що зі збільшенням тиску пари, збільшується і його температура. Це тягне за собою і збільшення температури нагріву мезги. Але в разі використання високих температур йде інтенсивна денатурація білків. Це різко знижує пластичність мезги. Як правило, така мезга має дуже неоднорідну структуру, що негативно позначається на процесі пресування.

Таким чином, при зволоженні мезги до $W_{к.з.}=11\%$ та сушінні до $W_{к.с.}=6,25\%$, витрата парогенератора $Q=0,194$ кг/хв, отримана найбільша відносна кількість олії $\mu_o=0,17$, при цьому відносна кількість фузи має найменше значення та складає $\eta_\phi=0,06$.

Для виявлення впливу зволоження мезги на кінцевий продукт (μ_o та η_ϕ) з урахуванням попередніх експериментів (рис. 4.15), проведені дослідження при тиску пари, що гріє $p_{ep}=0,3$ МПа та за різної початкової вологості $W_{к.з.}=9\%$, 11% та 13% (рис. 4.16).

Проведеними дослідженнями встановлено, що при зволоженні мезги до $W_{к.з.}=9\%$ та $W_{к.з.}=13\%$, максимальна відносна кількість олії становить $\mu_o=0,162$ та

$\mu_o=0,114$ відповідно. При такій кількості олії відносна кількість фузи становить $\eta_f=0,03$ та $\eta_f=0,05$ відповідно.

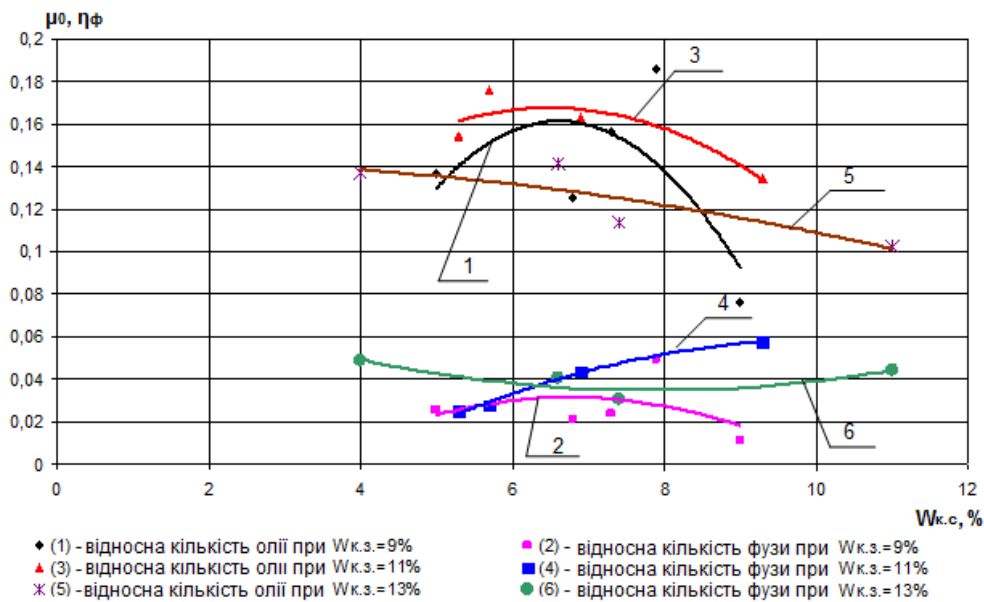


Рис. 4.16. Залежність відносної кількості олії і фузи від кінцевої вологості мезги після процесу її сушіння при $W_{к.з.}=9\%$; $W_{к.з.}=11\%$; $W_{к.з.}=13\%$ і $p_{зр}=0,3$ МПа

Отримана відносна кількість олії при зволоженні мезги до $W_{к.з.}=9\%$ та $W_{к.з.}=13\%$ має менше значення, ніж кількість олії ($\mu_o = 0,17$), отриманої при зволоженні м'ятки до $W_{к.з.}=11\%$. Це є переважаючим фактором при виборі необхідних режимів вологотеплової обробки м'ятки рицини в процесі виробництва рицинової олії.

Рівняння регресії залежностей наведених на рис. 4.16 мають вигляд:

- для відносної кількості олії і фузи при тиску пари, що гріє, при $p_{зр}=0,3$ МПа, та зволоженні мезги до $W_{к.з.}=11\%$ рівняння регресії наведені в формулах (4.43) та (4.46);

- для відносної кількості олії при тиску пари, що гріє, при $p_{зр}=0,3$ МПа, та зволоженні мезги до $W_{к.з.}=9\%$:

$$\mu_o = -0,0121W_{к.з.}^2 + 0,1601W_{к.з.} - 0,3683 \text{ при } R^2=0,9629, \quad (4.49)$$

- для відносної кількості олії при тиску пари, що гріє, при $p_{зр}=0,3$ МПа, та зволоженні мезги до $W_{к.з.}=13\%$:

$$\mu_o = -0,0004W_{к.с.}^2 + 0,0004W_{к.с.} + 0,1431 \text{ при } R^2=0,9995, \quad (4.50)$$

- для відносної кількості фузи при тиску пари, що гріє, при $p_{сп}=0,3$ МПа, та зволоженні мезги до $W_{к.з.}=9\%$:

$$\eta_\phi = -0,0027 \cdot W_{к.с.}^2 + 0,036 \cdot W_{к.с.} - 0,0904 \text{ при } R^2=0,7770, \quad (4.51)$$

- для відносної кількості фузи при тиску пари, що гріє, при $p_{сп}=0,3$ МПа, та зволоженні мезги до $W_{к.з.}=13\%$:

$$\eta_\phi = 0,001 \cdot W_{к.с.}^2 - 0,0152 \cdot W_{к.с.} + 0,0944 \text{ при } R^2=0,9920, \quad (4.52)$$

Коефіцієнти детермінації рівнянь регресії (4.43) – (4.52), вказують, що рівняння регресії (4.43) – (4.52) достатньо точно відображають значення μ_o і η_ϕ , отримані експериментальним шляхом. Перевіркою за критерієм Фішера встановлено, що всі коефіцієнти детермінації значимі для всіх значень α , окрім $\alpha=5\%$.

При перевірці за критерієм Стюдента встановлено, що усі коефіцієнти рівнянь регресії (4.43) – (4.52) значимі.

Таким чином, експериментальними дослідженнями встановлено режими волого-теплової обробки м'ятки рицини перед її пресуванням: тиск пари, що гріє становить $p_{сп}=0,3$ МПа; кінцева вологість мезги для періоду зволоження $W_{к.з.}=11\%$; кінцева вологість мезги для періоду сушки $W_{к.с.}=6,25\%$. Це дозволило отримати критерії ефективності технологічного процесу на рівні: відносна кількість олії становить $\mu_o=0,17$, відносна кількість фузи - $\eta_\phi=0,06$.

Обробка м'ятки насіння рицини вологою і теплом при інтенсивному перемішуванні та доведенням її вологості і температури до оптимальних величин на протязі визначеного часу викликає змінення ряду фізико-хімічних властивостей м'ятки і олії, яка в ній міститься, що сприяє найкращому ефекту віджиму олії.

Волого-теплова обробка є однією з найважливіших технологічних операцій при підготовці насіння рицини до віджиму олії пресуванням та надає вирішальний вплив на кількість і якість кінцевих продуктів: олії, макухи чи шроту. Але, максимальна кількість олії з насіння рицини буде забезпечуватися тільки при оптимальних значеннях технологічних режимів волого-теплової обробки м'ятки насіння рицини. Визначення оптимальних значень технологічних режимів волого-теплової обробки м'ятки перед віджимом олії можливе тільки шляхом проведення планового експерименту з подальшою процедурою оптимізації.

Функції $\mu_o=f(W_{к.с.})$ (4.43) – (4.45), (4.49) були досліджені на екстремум за умови $\mu_o \rightarrow \max$ методом градієнтного спуску на персональному комп'ютері в програмі МATHCAD функцією Maximize. Оптимальні значення $W_{к.с.}$ за умови максимального виходу олії наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Оптимальні значення $W_{к.с.}$ за умови максимального виходу олії

Тиск пари, кПа	Оптимальне значення $W_{к.с.}$, %	Значення функції $\mu_o=f(W_{к.с.})$, що відповідає оптимальному значенню $W_{к.с.}$
Після процесу сушіння м'ятки при $W_{к.з.}=11\%$		
3	6,326	0,17
4	7,52	0,121
5	4,305	0,153
Після процесу сушіння м'ятки при $W_{к.з.}=9\%$		
3	6,616	0,161

Функція $\eta_\phi=f(W_{к.с.})$ (4.32) була досліджена на екстремум за умови $\eta_\phi \rightarrow \min$ методом дихотомії на персональному комп'ютері в програмі МATHCAD, для чого була розроблена спеціальна програма.

Оптимальне значення $W_{к.с.}$ за умови мінімального виходу фузу $W_{к.з.}=13\%$ і $p_{зр}=0,3$ кПа становить 7,6%, при цьому $\eta_\phi=0,037$.

Залежність оптимальних значень $W_{к.с.}$ за умови максимального виходу олії від тиску граючої пари при $W_{к.з.}=11\%$ наведена на рис. 4.17.

Залежність оптимальних значень $W_{к.с. опт}$ за умови максимального виходу олії від тиску граючої пари при $W_{к.з.}=11\%$ апроксимується виразом:

$$W_{к.с. опт} = -2,2 \cdot p_{зр}^2 + 16,6 \cdot p_{зр} - 23,7 \text{ при } R^2=1,0. \quad (4.53)$$

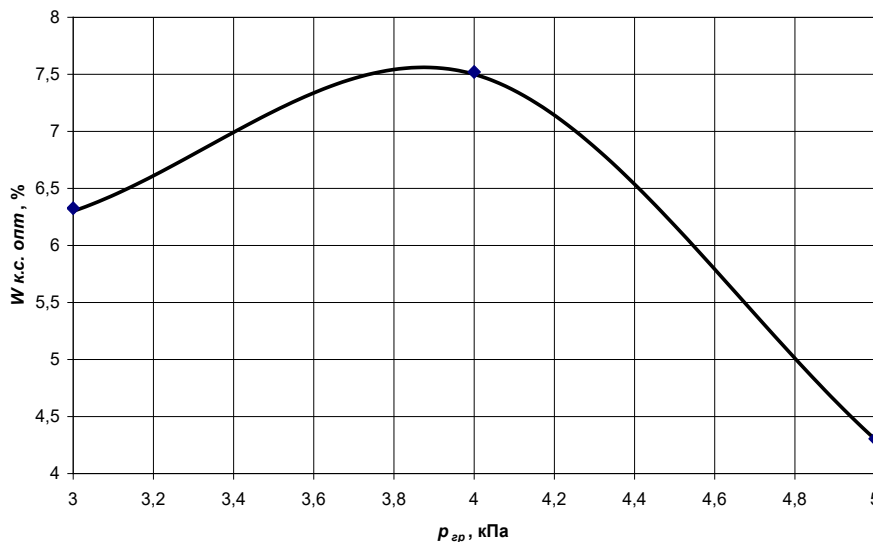


Рис. 4.17. Залежність оптимальних значень $W_{к.с. опт}$ за умови максимального виходу олії від тиску граючої пари при $W_{к.з.}=11\%$

Коефіцієнт детермінації рівняння регресії (4.43) вказує, що рівняння регресії (4.43) повністю відображає значення $W_{к.с. опт}$, наведені в табл. 1. Перевіркою за критерієм Фішера встановлено, що коефіцієнт детермінації значимий для всіх значень α . При перевірці за критерієм Стьюдента встановлено, що усі коефіцієнти рівняння регресії (4.43) значимі.

4.2.4. Експериментальна перевірка адекватності математичних моделей віджимання і фільтрації рицинової олії

Експериментальні дослідження проводилися відповідно до програми і методики експериментальної перевірки адекватності математичних моделей процесів віджимання та фільтрації касторової олії крізь шар мезги в пресі (п. 4.2). Для проведення експериментів і чисельного дослідження процесів, що відбуваються у форпресі по розробленій ма-

тематичній моделі, необхідно було вивчити характеристику преса ФП. В таблиці 4.3 наведені результати розрахунку основних параметрів шнекового валу преса ФП, у тому числі ступінь стиснення витків шнекового валу, як відношення вільного об'єму першого витка до k -го витка.

Таблиця 4.3

Розрахунок параметрів шнекового валу преса ФП

Найменування параметрів	Номера витків шнека							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_z – діаметр зєєра, мм	–	250	250	200	200	220	220	240
$D_{ш}$ – діаметр шнека, мм	247	247	247	197	197	217	217	237
d_b – діаметр втулки шнека, мм	122	122	122	122	134	176	184	204
S – крок шнека, мм	290	235	155	130	115	110	100	84
$l_{ш}$ – довжина шнека, мм	230	180	140	115	95	100	100	70
l_b – довжина втулки проміжної, мм	30	30	30	30	45	35	35	30
d_1 – вхідний діаметр втулки, мм	122	122	122	122	134	176	184	204
d_2 – вихідний діаметр втулки, мм	122	122	122	134	176	184	204	207
α – кут нахилу нитки витка до торця, рад	0,357	0,294	0,19	0,20	0,18	0,16	0,14	0,112
β – кут нахилу передньої грані нитки, рад	0,079	0,079	0,06 3	0,10 6	0,09 5	0,09 7	0,12 0	0,120

1	2	3	4	5	6	7	8	9
θ – робочий кут витка, рад; $\theta = 2\pi l_{\text{ш}} / S$.	4,980	4,810	5,67	5,55	5,18	5,70	6,28	5,233
$V_3 = \frac{\pi D_3}{4} l_{\text{ш}}$ – об’єм зес- рної камери, дм^3	11,28	8,831	6,86	3,61	2,98	3,79	3,79	3,165
$V_{\text{в}} = \frac{\pi d_{\text{в}}}{4} l_{\text{ш}}$ – об’єм втулки з валом, дм^3	2,687	2,103	1,63	1,34	1,33	2,43	2,65	2,286
$D_{\text{ср}} = \frac{d_{\text{в}} + D_{\text{ш}}}{2}$ – середній діаметр витка, мм	184,5	184,5	184,	159,	165,	196,	200,	220,5
$l_{\text{ср}} = \pi D_{\text{ср}}$ – довжина кола по середньому діаметру витка, мм	579,3	579,3	579,	500,	519,	617,	629,	692,3
$l = \sqrt{S^2 + l_{\text{ср}}^2}$ – загальна довжина нитки, мм	647,8	625,1	599,7	517,	532,	626,	635,	697,4
$L = l \cdot \theta / 6,28$ – діюча довжина нитки, мм	513,8	478,8	541,	457,	439,	569,	635,	581,1
$F = (a + b)h / 2$ – площа перетину нитки, що розглядається прибли- зно як трапеція, дм^2	0,168	0,156	0,12	0,06	0,05	0,03	0,02	0,028
$V_{\text{н}} = L \cdot F$ – об’єм ни- тки, дм^3	0,867	0,748	0,66	0,30	0,23	0,19	0,17	0,163
$V_{\text{вн}} = V_{\text{в}} + V_{\text{н}}$ – об’єм, що займається витком, дм^3	3,554	2,851	2,29	1,65	1,57	2,63	2,83	2,449

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_n = V_3 - V_{\text{вн}}$ – вільний об'єм, дм ³	7,73	5,979	4,57	1,95	1,40	1,16	0,96	0,715
$\varepsilon_n = V_1 / V_n$ – ступінь стиснення шнекового вала	1	1,292	1,69	3,94	5,48	6,61	8,02	10,80
$\varepsilon_k = V_{k-1} / V_k$ – ступінь стиснення k -го витка	1	1,292	1,29	2,33	1,39	1,20	1,21	1,347
$\psi = V_3 / V_{\text{вн}}$ – коефіцієнт заповнення зерної ка- мери	0.315	0.322	0.33	0.45	0.52	0.69	0.74	0.774

В.А. Масліков наводить дані, що закон стиснення мезги в шнековому валу фор-преса ФП можна описати степеневою функцією

$$\varepsilon_{\text{ш.в.}} = \frac{V_1}{V_n} = n^{1,145}. \quad (4.47)$$

Отримана ступінь стиснення на шнековому валу (таблиця 4.4), дозволила перевірити ступінь точності запропонованої функції. На рисунку 4.18 представлені залежності стиснення мезги в пресі ФП, отримані трьома шляхами: 1 – на основі геометричних параметрів витків вала преса, 2 – за формулою (4.47), 3 – на підставі проведеної нами статистичної обробки геометричних параметрів. Для подальших досліджень використовували ступінь стиснення у витках преса, що отримані на основі фактичних параметрів преса ФП. Так, за розрахунками, ступінь стиснення мезги на шнековому валу склала 10,80.

Однак слід враховувати такі обставини. При роботі, всередині зеєра виникають два потоки: один – вимушений потік, викликаний обертанням шнекового вала і спрямований вздовж гвинтового каналу; другий – протитечія, що викликається градієнтом тиску, що з'явився у результаті протитиску виходячої із преса мезги.

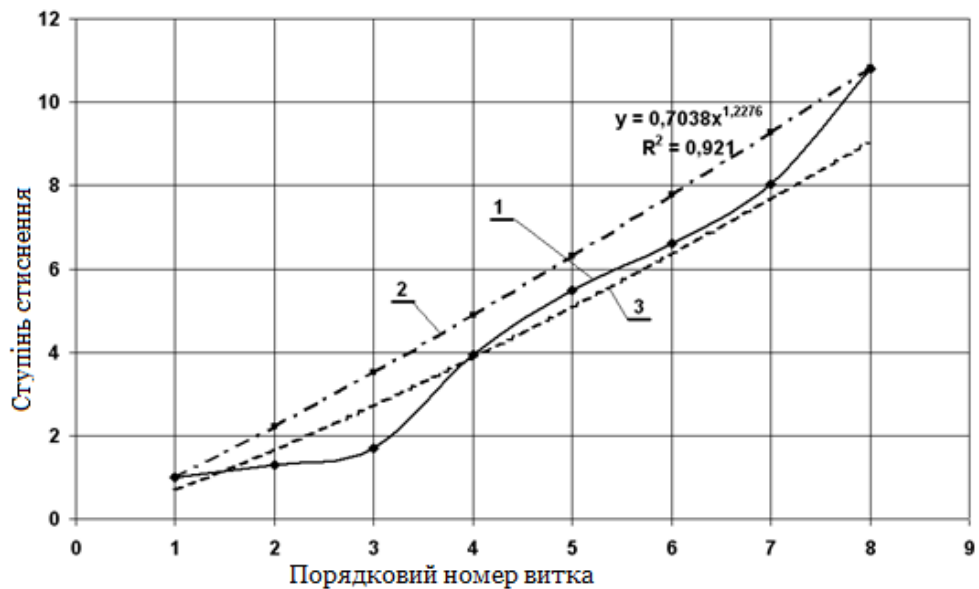


Рис. 4.18. Залежність ступеня стиснення мезги в шнековому вала преса ФП: 1 – отримана на основі геометричних параметрів витків валу; 2 – отримана на підставі залежності (4.47); 3 - лінія тренда кривої 1

Другий потік може бути розділений на декілька потоків: протитечія вздовж гвинтового каналу; протитечія в зазорі між вершиною нитки і внутрішньою поверхнею зєсра; протитечія в кут розриву нитки витка. Тому дійсна ступінь стиснення мезги при роботі преса сильно відрізняється від розрахункової, отриманої відповідно до геометричних параметрів шнекового вала. У нашій задачі ми брали кількість профільтрованого масла пропорційно зміні коефіцієнта пористості мезги на кожному витку преса, що залежить у свою чергу від ступеня стиснення мезги в кожному витку преса. Визначення істинного ступеня стиснення, а від сюди і зміни коефіцієнта пористості, важливий етап в цій задачі.

Визначаємо теоретичний $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{T}}$ і фактичний ступінь стиснення преса $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{ф}}$ з урахуванням протитечії за розробленою методикою.

Результати розрахунків теоретичного і фактичного ступенів стиснення мезги в пресі представлені в таблиці 4.4. Де δ – ширина вихідної щілини (в мм) при якій пра-

цює прес; k – деякий коефіцієнт, величина якого залежить від ширини вихідної щілини преса; ν – відношення теоретичного до практичного ступеня стиснення мезги на конусі преса при робочій ширині вихідної щілини.

Таблиця 4.4

Розрахунок параметрів стиснення преса ФП

δ	k	$\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{T}}$	$\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{Ф}}$	ν
6	2,224189	24,03592	8,9200424	2,908560186
7	1,951043	21,08414	7,1820158	3,248801143
8	1,741701	18,82187	6,1128139	3,485726324
9	1,575774	17,02876	5,4986972	3,562978188
10	1,440788	15,57002	5,2089194	3,461700882
11	1,328668	14,35838	5,1588286	3,212053509
12	1,233946	13,33476	5,2911172	2,874486859

Результати розрахунку фактичного ступеня стиснення на витках преса ФП в залежності від ширини вихідної щілини преса представлені в таблиці 4.5. Де $\varepsilon_{\text{ш.в.}}$ – ступінь стиснення мезги, що створюється шнековим валом.

Таблиця 4.5

Результати розрахунку фактичного ступеня стиснення мезги на витках преса ФП

№ пресуюч. витка	Довж. шнеков. вала	$\varepsilon_{\text{ш.в.}}$	δ – ширина вихідної щілини, мм						
			6	7	8	9	10	11	12
			Фактичний ступінь стиснення на пресуючому витку шнека						
1	210	1	1,42	1,29	1,21	1,16	1,12	1,10	1,08
2	350	1,2927	1,64	1,47	1,36	1,29	1,25	1,22	1,20
3	495	1,6904	1,94	1,71	1,56	1,47	1,41	1,38	1,37
4	590	3,9471	3,67	3,06	2,68	2,46	2,35	2,32	2,34
5	735	5,4862	4,85	3,99	3,45	3,14	2,99	2,95	3,00
6	870	6,6111	5,71	4,66	4,02	3,64	3,46	3,42	3,49

7	975	8,0225	6,79	5,51	4,72	4,27	4,05	4,01	4,09
8	1075	10,8066	8,92	7,18	6,11	5,50	5,21	5,16	5,29

Розрахунки показали, що ступінь стиснення у витках шнекового вала преса ФП по вільному обсягу витків змінюється від 1 до 10,8 (таблиця 4.5). Фактична ступінь стиснення мезги на витках при ширині вихідної щілини 6 мм змінюється від 1,42 до 8,9 (таблиця 4.5); при ширині щілини 8 мм від 1,21 до 6,11, а при ширині щілини 12 мм від 1 до 5,29. За основу подальших розрахунків прийнята ширина вихідної щілини 8 мм, тобто при ступені стиснення мезги не вище 6,11. В таблиці 4.6 представлені геометричні параметри шнекового преса ФП, необхідні для розрахунку його фільтраційних можливостей при переробці насіння олійних культур.

Таблиця 4.6

Геометричні параметри шнекового преса ФП

n	D, см	L, см	ω , см ²	r, см
2	24,7	21	1628,718	6,25
3	24,7	14	1085,812	6,25
4	19,7	14,5	896,941	3,75
5	19,7	9,5	587,651	3,15
6	21,7	14,5	988,001	2,05
7	21,7	13,5	919,863	1,65
8	23,7	10,5	781,389	1,65
9	24	10	753,6	1,5
10	21,6	5	339,12	1,05

Проведення досліджень процесу віджимання мезги у пресі. Для замикання вихідної системи рівнянь математичної моделі консолідації мезги насіння ріцини в шнекових пресах, експериментальним шляхом були встановлені необхідні характеристики мезги насіння ріцини. Всі наведені нижче експерименти проводилися з мезгою насіння ріцини, отримані при температурі жаріння і подальшому пресуванні 90⁰С і вологістю 6,55%.

На рисунку 4.19 наведена залежність зміни питомого тиску в мезгі від її ступеня стиснення при температурі жаріння і пресування мезги 90⁰С і вологістю 6,55%. Отримана залежність описується експоненціальним рівнянням з кореляційним відношенням $\eta_{y/x} = 0,994$

$$\sigma = a \cdot \exp(b\varepsilon_v), \quad (4.48)$$

де σ – питомий тиск в мезгі у кг/см²,

ε_v – ступінь стиснення мезги,

$a = 8,30E - 02$; $b = 1,232$ – експериментальні коефіцієнти, що отримані при температурі жаріння і пресування мезги насіння ріцини 90⁰С і вологістю 6,55%.

На рисунку 4.19 наведено залежність зміни ступеня стиснення від питомого тиску в діапазоні від 0 до 137 кг/см² при температурі жаріння і пресування мезги 90⁰С і вологістю 6,55%. На рисунку 4.19 представлена залежність зміни питомого тиску в мезгі від коефіцієнта пористості при температурі жаріння і пресування мезги 90⁰С і вологістю 6,55%.

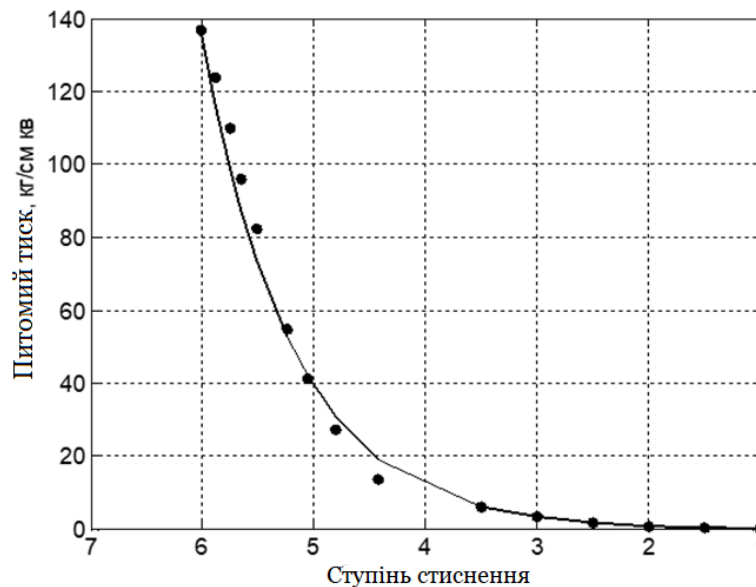


Рис. 4.19. залежність зміни питомого тиску в мезгі від її ступеня стиснення при температурі жаріння і пресування мезги 90⁰С і вологістю 6,55%

Отримана залежність зміни ступеня стиснення від удельного тиску є зворотною функцією (4.48) і описується логарифмічною залежністю, отриманою з (4.48)

$$\sigma = a \cdot \exp(b\varepsilon_v), \quad (4.48)$$

де σ – питомий тиск у мезгу в $\text{кг}/\text{см}^2$,

ε_v – ступінь стиснення мезги,

$a = 8,30 \text{ E} - 02$; $b = 1,232$ – експериментальні коефіцієнти, отримані при температурі смаження.

На рис.4.20 наведено залежність зміни ступеня стиснення від питомого тиску в діапазоні від 0 до $137 \text{ кг}/\text{см}^2$ при температурі смаження та пресування мезги 90°C вологістю $6,55\%$. та пресування мезги насіння ріцини при 90°C та вологістю $6,55\%$.

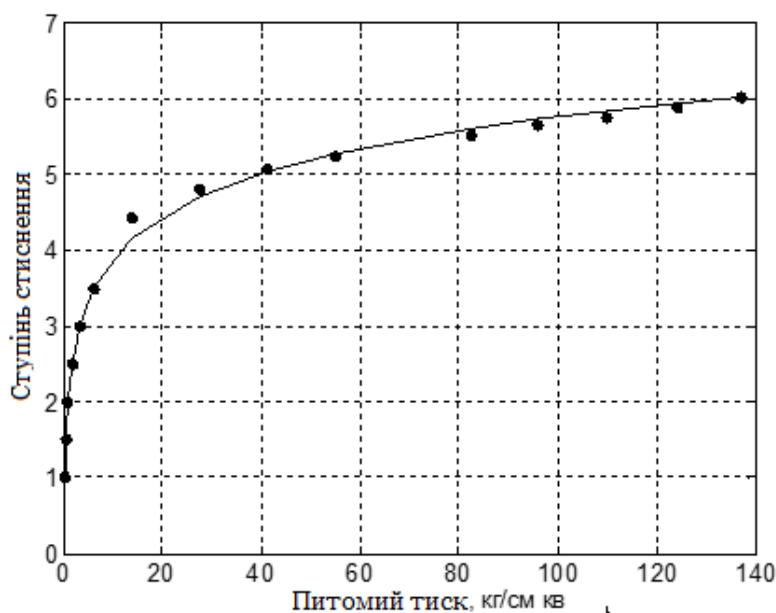


Рис. 4.20. Залежність зміни ступеня тиску від питомого тиску у діапазоні від 0 до 137 кг

На рис. 4.21 представлена залежність зміни питомого тиску в меззі від коефіцієнта пористості при температурі смаження та пресування мезги 90°C во-

логістю 6,55%. Полученная зависимость изменения степени сжатия от удельного давления является обратной функцией (4.48) и описывается логарифмической зависимостью, полученной из (4.48)

$$\varepsilon_v = (\ln \sigma - \ln a) / b. \quad (4.49)$$

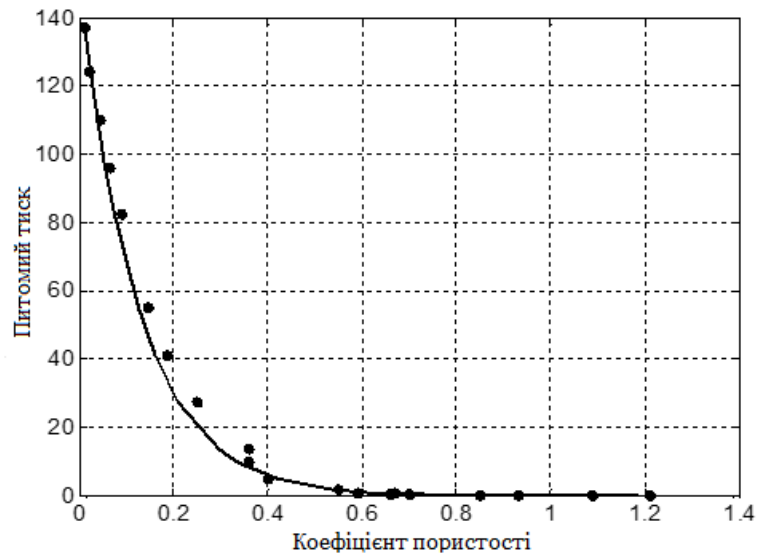


Рис. 4.21. Залежність зміни питомого тиску в мезгі від коефіцієнта пористості при температурі жаріння і пресування мезги 90⁰С і вологістю 6,55%.

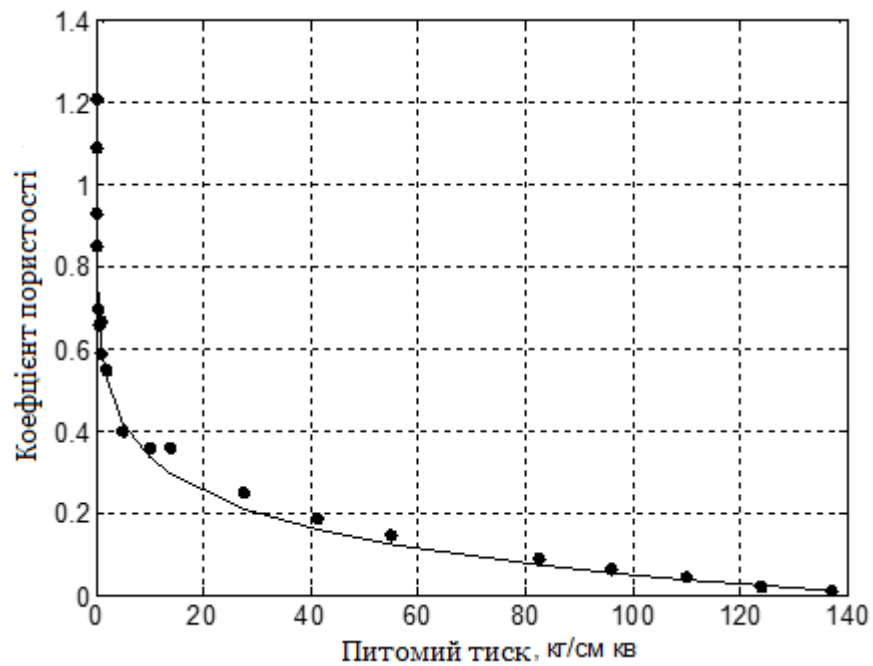


Рис. 4.22. Зависимость изменения коэффициента пористости от удельного давления в диапазоне от 0 до 137 кг/см²

При розгляді ущільнення «скелета» оброблюваного матеріалу наростання повзучих деформацій доцільно описати залежністю, що характеризує зміну коефіцієнта пористості матеріалу. На рисунку 4.22 наведена залежність зміни коефіцієнта пористості від питомого тиску в діапазоні від 0 до 137 кг/см².

Отримана залежність зміни питомого тиску в мезгі від коефіцієнта пористості описується експоненціальним рівнянням з кореляційним відношенням $\eta_{y/x}=0,999$

$$\sigma = c \cdot \exp(d\varepsilon), \quad (4.50)$$

де ε – коефіцієнт пористості мезги;

$c = 150,917$; $d = 8,10$ – експериментальні коефіцієнти, отримані при температурі жаріння і пресування мезги насіння ріцини 90⁰С і вологості 6,55%.

Залежність коефіцієнта пористості від питомого тиску (рисунок 4.20) є зворотною функцією (4.50) і описується логарифмічною залежністю, отриманою з (4.50)

$$\varepsilon = (\ln\sigma - \ln c)/d. \quad (4.51)$$

Або після перетворення

$$\varepsilon = a \cdot \ln\sigma + b. \quad (4.52)$$

Отримані значення коефіцієнтів рівняння (4.52) при температурі жаріння і пресування мезги 90⁰С в залежності від вологості мезги представлені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Коефіцієнти логарифмічних функцій коефіцієнтів пористості

Коефіцієнти поліному	Температура 90 ⁰	Коефіцієнти кореляції
a	$0,0564w - 0,592$	0,9855
b	$-0,4457w + 4,5156$	0,9912

На підставі отриманих даних побудовані графіки залежностей кількості відфільтрованої олії через шар мезги (рис. 4.23), а по рівнянню (4.22) побудовані залежності радіальних коефіцієнтів фільтрації від ступеня стиснення при показниках ступеня $K=0,145$ і $K=0,945$ при часу стиснення 3,33 (рисунок 4.24).

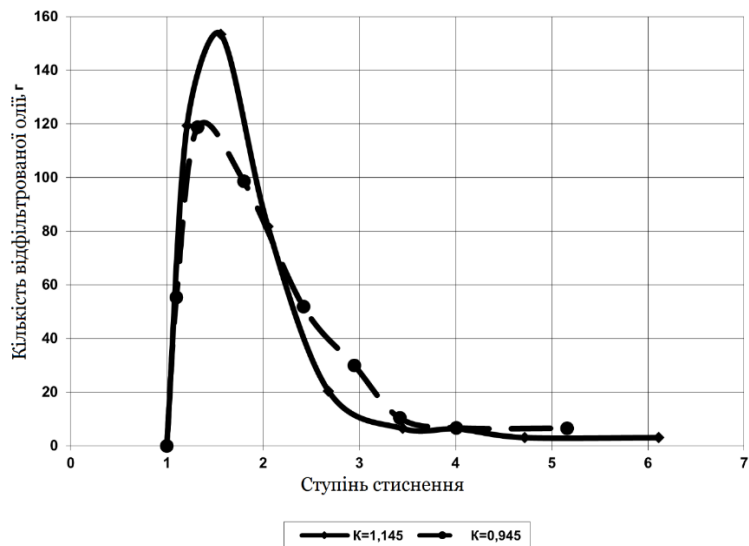


Рис. 4.23. Залежність кількості відфільтрованої рицинової олії через шар мезги від ступеня її стиснення в лабораторному пресі

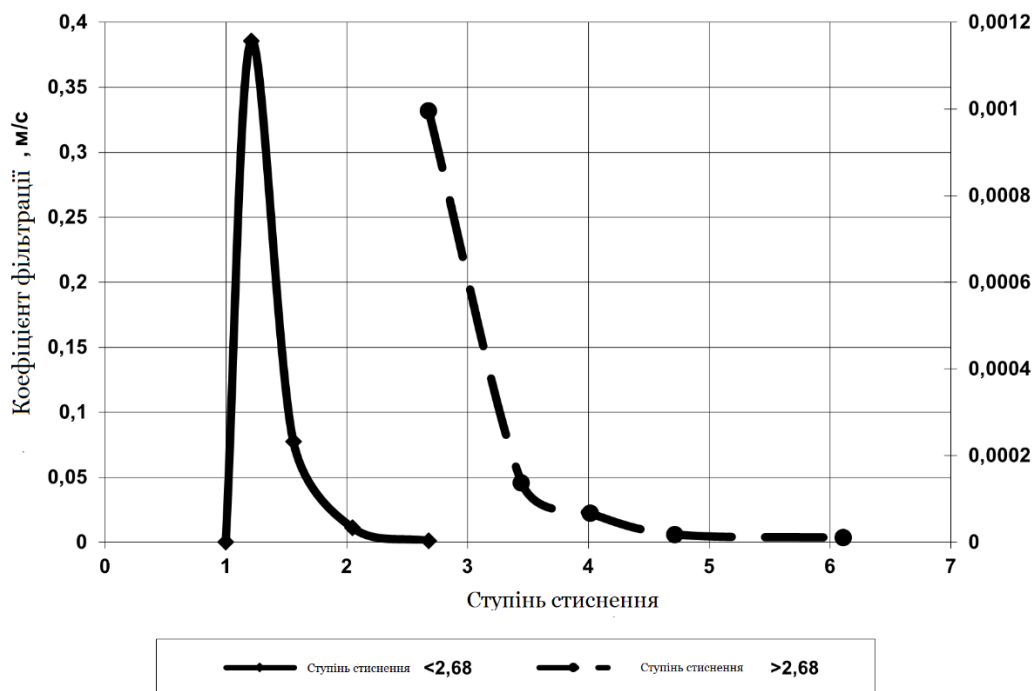


Рис. 4.24. Залежності радіальних коефіцієнтів фільтрації касторової олії від ступеня стиснення

Реологічні властивості отриманої мезги насіння рицини при проведених режимах жаріння відповідали вимогам умов пресування у лабораторному пресі при режимах пресування, що проводилися.

Дослідження фільтрації касторової олії через шар мезги у пресі При кожному ступеню стиснення відбиралася віджата олія, визначалася її маса і об'єм в см³. За обсягом відфільтрованої олії, часу витримки при кожному ступеню стиснення і площі фільтрації визначалася швидкість фільтрації олії.

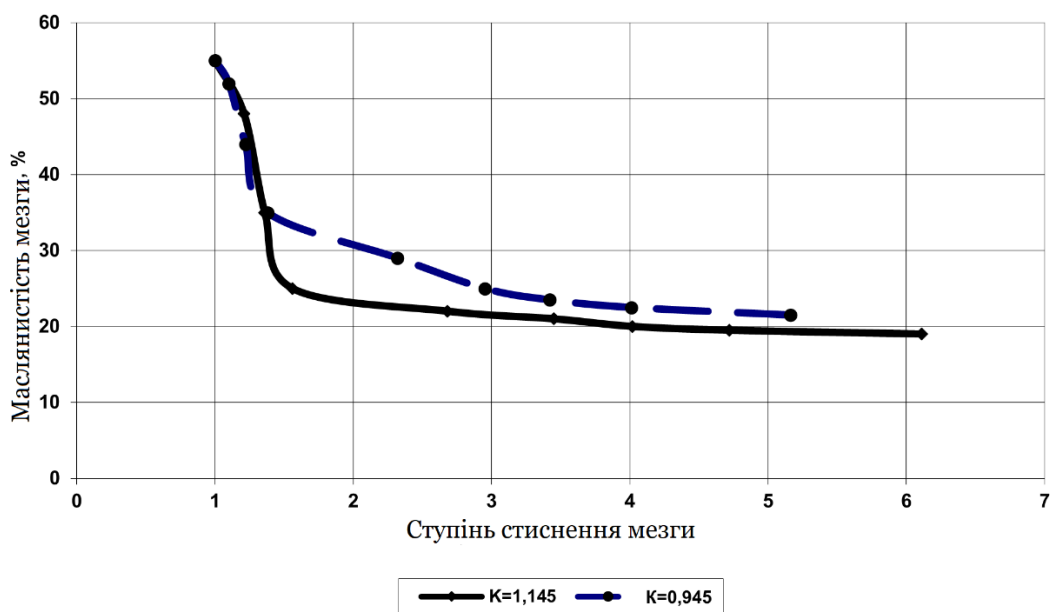


Рис. 4.25. Вплив ступеня стискання на олійність мезги на абсолютно суху речовину при різному законі стиснення шнекового валу

За експериментальними даними кількості відфільтрованої касторової олії через шар мезги при різному ступені її стиснення, при відомій площі фільтрації на лабораторному пресі, побудовані криві залежностей олійності мезги від ступеня її стиснення при різних геометричних параметрах шнекового валу (рис. 4.26).

Перевірка адекватності математичних моделей процесів віджиму та фільтрації касторової олії через шар мезги в пресі. Обробка отриманих експериментальних даних дозволила отримати рівняння, що описує залежність питомого тиску від ступеня стиснення, а також рівняння зміни коефіцієнта пористості мезги в залежності від напруги. Цими рівняннями замкнулася вихідна система диференціальних рівнянь, яка дала змогу визначити потрібне рівняння консолідації мезги.

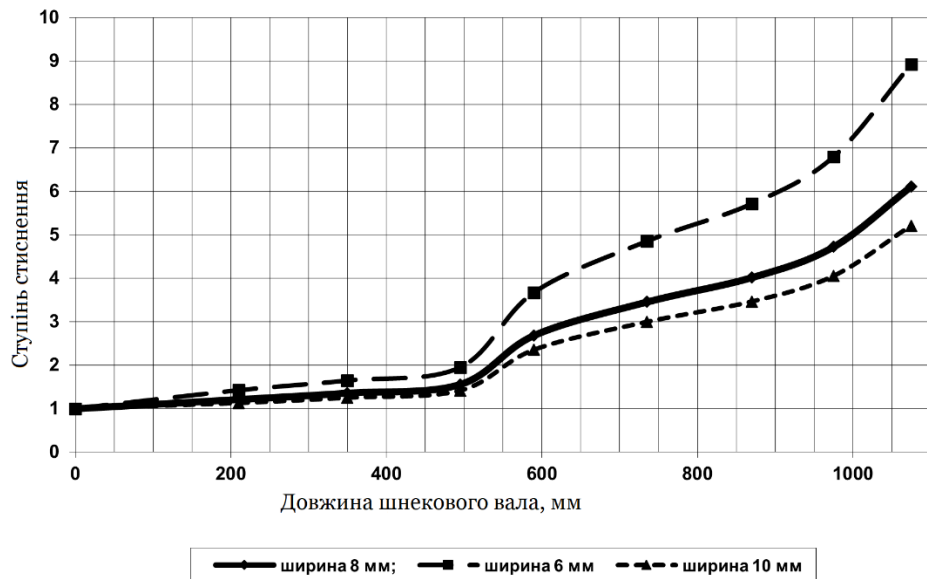


Рис. 4.26. Ступінь стиснення мезги на витках шнекового преса при різній ширині вихідної щілини

На рисунку 4.27 представлено отримані розрахунковим шляхом залежності ступеня стиснення мезги на витках шнекового преса при різній ширині вихідної щілини преса. За результатами розрахунків ступінь стиснення на витках преса ФП в залежності від ширини вихідної щілини преса і отриманою залежністю між напругою і ступенем стиснення, визначалися радіальні напруги по довжині вала шнекового преса (рис. 4.27).

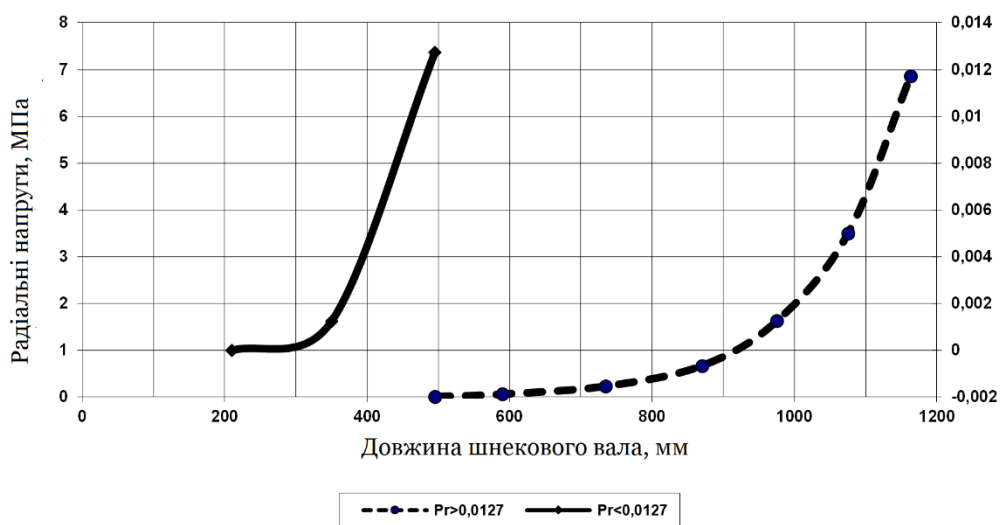


Рис. 4.27. Радіальна напруга в меззі рицини по довжині валу шнекового преса ФП, МПа

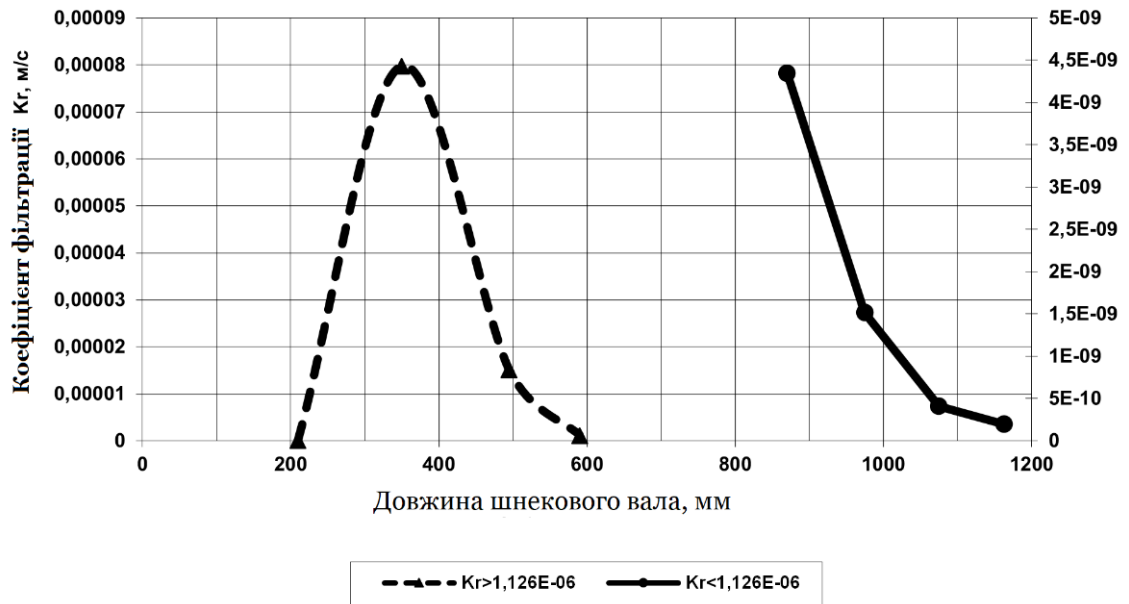


Рис. 4.28. Радіальні коефіцієнти фільтрації касторової олії через шар мезги робочої порожнини шнекового валу преса ФП, м/с.

За результатами розрахунків ступінь стиснення на витках преса ФП залежно від ширини вихідної щілини та отриманих експериментально на лабораторному пресі радіальних коефіцієнтів фільтрації, визначалися радіальні коефіцієнти фільтрації за довжиною шнекового валу (рис. 4.28).

Значення коефіцієнтів фільтрації та напруг підставляються в рівняння консолідації мезги. Вирішуючи рівняння консолідації мезги методом кінцевих елементів, отримали поля гідродинамічного тиску олії в просторі, зайнятому рухомою мезгою в шнековому пресі по довжині шнекового валу і по радіусу Зеєра (рисунок 4.29).

За даними гідродинамічного тиску порової олії, використовуючи метод кінцевих різниць при вирішенні рівняння фільтрації, отримані теоретичним шляхом чисельні значення кількості фільтрованої олії (рисунок 4.30) і олійність мезги (рисунок 4.31) по довжині валу шнекового преса.

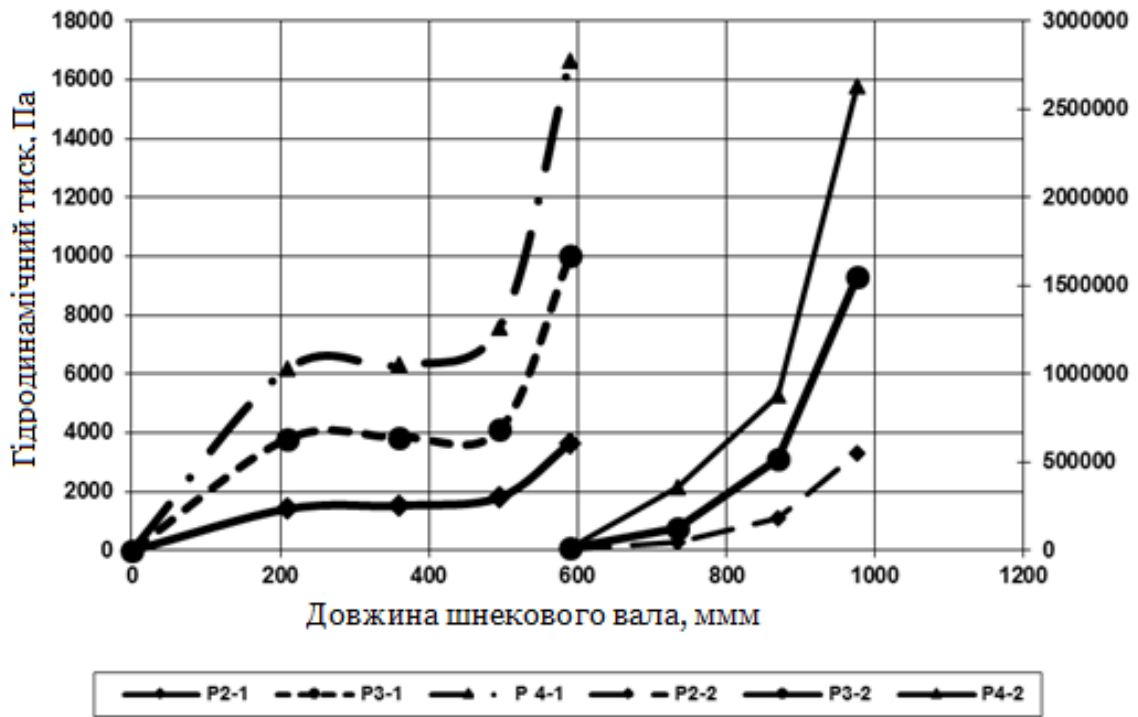


Рис. 4.29. Поле гідродинамічного тиску олії в просторі, зайнятому рухомою мезгою в шнековому пресі, Па (Результати чисельних досліджень)

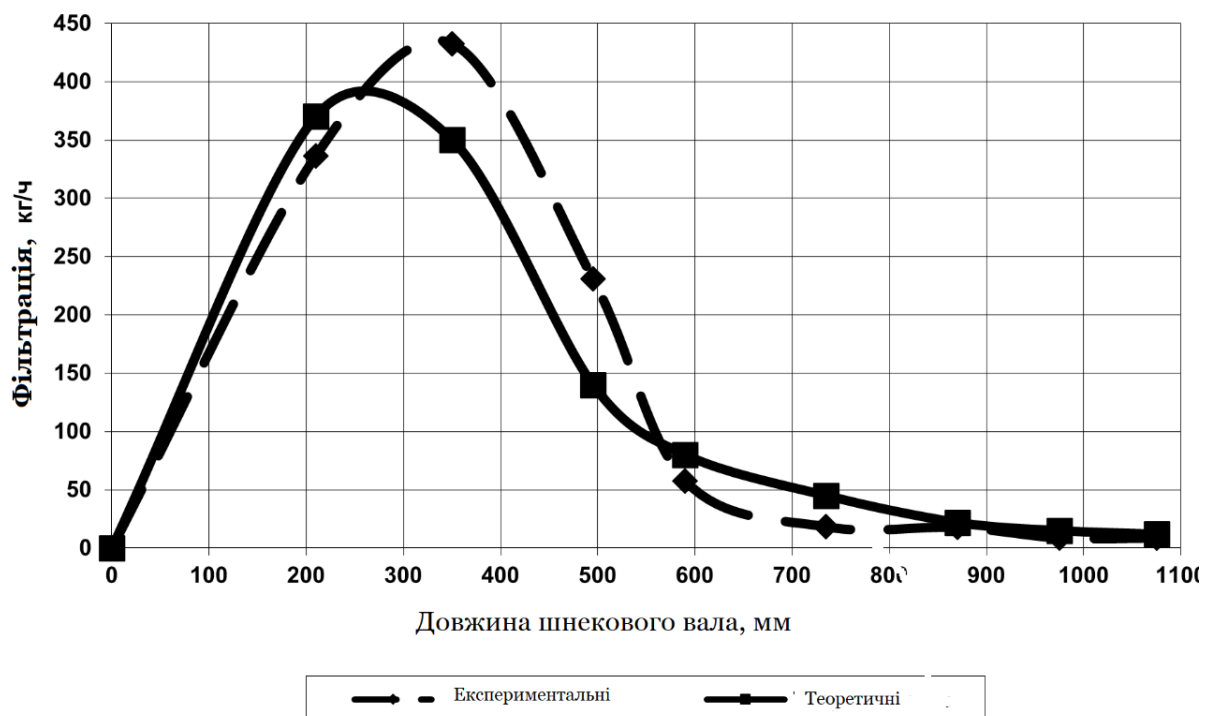


Рис. 4.30. Результати теоретичних і експериментальних досліджень фільтрації олії за довжиною шнекового валу преса ФП

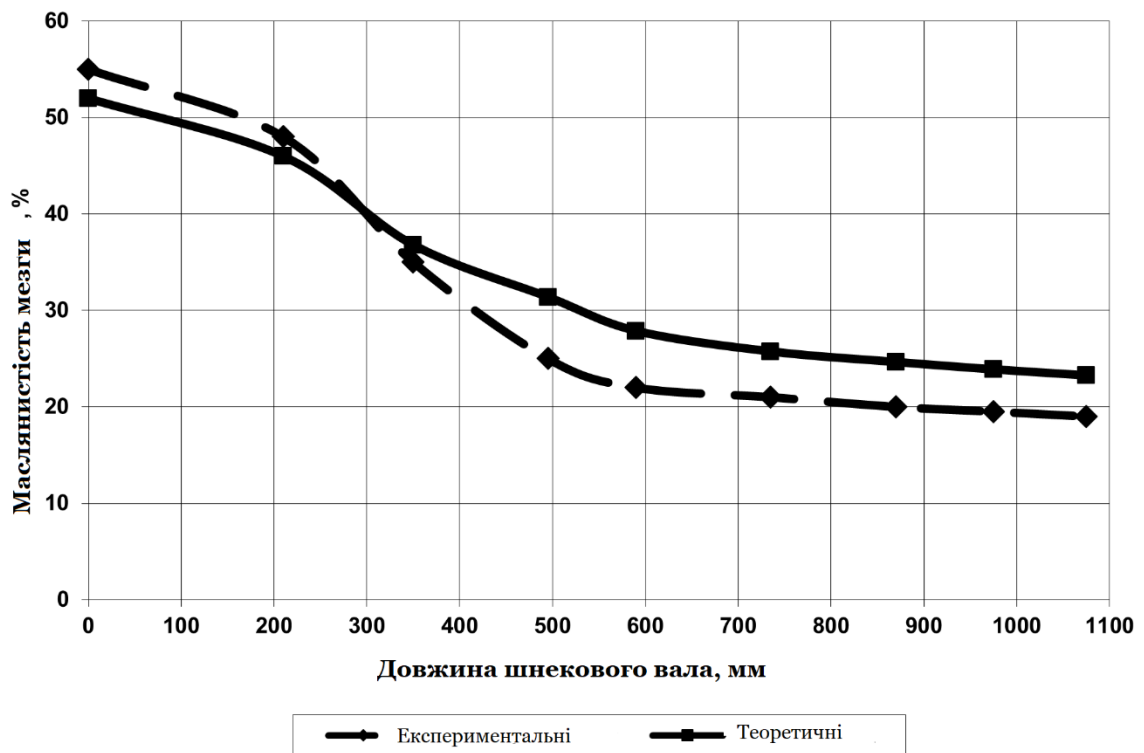


Рис. 4.31. Порівняльні результати теоретичних і експериментальних досліджень зміни олійності мезги насіння рицини за довжиною валу шнекового преса ФП, % на абсолютно суху речовину

Експериментальну залежність кількості відфільтрованої олії за довжиною зеєра у шнековому пресі (рис. 4.30) визначили на основі лабораторних досліджень за розробленою і представленою методикою. Олійність мезги за довжиною шнекового преса визначили за даними фільтрації олії по рівнянню (4.30). Результати отримані при продуктивності преса 2,5 т/год і вихідної олійності насіння 55% на абсолютно суху речовину. Відносна похибка теоретичних результатів не перевищує 35%.

Порівняльні результати теоретичних і експериментальних досліджень зміни олійності мезги насіння рицини за довжиною валу шнекового преса ФП представлені на рисунку 4.29. Відносна похибка теоретичних результатів не перевищує 27%.

4.3. Розробка технологічної схеми переробки насіння рицини на малотоннажних підприємствах

В результаті великої різниці фізико-механічних і хімічних властивостей насіння рицини від властивостей інших насіння олійних культур, без радикальних реконструкції підприємств переробку рицини здійснити неможливо. Для відродження виробництва і переробки рицини доцільно паралельно розширенню площ під цю культуру створювати малотоннажні підприємства з її переробки.

Раніше переробка насіння рицини здійснювалася за схемою попереднього пресування - екстракції з відділенням лузги на шельмашині і знешкодженні рицинової макухи [34]. Попереднє зняття олії здійснюється в апаратах Скрипіна і подальше віджимання на шнекових пресах. Знешкодження рицинової макухи здійснюється в п'ятичанній жаровні за рахунок пропарювання гострим насиченим паром з одночасним введенням гарячої води до вологості 15-18% і температури 105-110°C в верхньому чані. Наступна сушка здійснюється глухим паром з доведенням температури до 130-135° С і зниженням вологості до 7,0-10,0%. Знешкоджена макуха, використовується для кормових цілей, повинна мати негативну реакцію (аглотинації еритроцитів) на присутність рицину. Зміст матеріалу в межах 20-40 мг / кг і лузги не більше 11,0%.

У 1968 році входить тимчасова інструкція з переробки необрушеного насіння рицини за схемою форпресування - екстракція [2]. Подальші дослідження підтвердили необхідність відмови від обрушення насіння через недосконалість шельмашини і технології підготовки насіння до обрушення, що викликало, підвищену олійність відокремленого лущиння та втрату олії [3,4].

Рицин інактивується нагріванням паром і введенням вологи. Однак, алерген рицини не руйнується при звичайному способі детоксикації, і люди, що мають справу з рициновим шротом або макухою можуть придбати підвищену чутливість до нього і страждати від алергічних реакцій [5]. Дослідження по детоксикації алергену рицини проводиться хімічними реагентами.

В даний час в Україні створена ціла мережа малотоннажних цехів (маслоробок) з виробництва соняшникової олії. Устаткування цих цехів має ряд істотних недоліків. Самим великим недоліком є застосування вологотеплової обробки м'ятки в вогненних жаровнях при контактній температурі 400-700° С, з великою нерівномірністю температурного поля в просторі і в часі, відсутністю можливості управляти тепловими режимами і неможливістю інактивації ферментної системи насіння.

Дослідженнями, проведеними в США, Англії [6] та інших країнах, встановлено, що вже при температурі 115-135° С в рослинних оліях інтенсивно протікають окислювальні і гідролізний процеси. Окислення олій, що почалися в процесі переробки насіння, тривають в готовому продукті в процесі зберігання, насичуючи його канцерогенами і мутагенні продуктами окислення.

Жорсткі режими вологотеплової обробки різко знижують перетравність і засвоюваність білків, викликаючи гідроліз незамінних дефіцитних амінокислот, перш за все лізину [7]. Різко знижується якість макухи, як високобілкових кормових добавок.

Головною вимогою до технологічної схеми переробки рицини є те, що вона повинна бути адаптована до малотоннажного виробництва і забезпечувати отримання високоякісної медичної, технічної рицинової олій і рицинової макухи - високобілкової кормової добавки.

Аналіз робіт з переробки насіння рицини, проведених вітчизняними і зарубіжними дослідниками і авторами даної монографії [8,9,10,11,12], дозволили розробити для малотоннажних підприємств технологію переробки насіння рицини за схемою дворазового пресування без екстракції і знешкодження токсичних речовин рицинової макухи.

Технологічна схема переробки насіння рицини, яка пропонується авторами, представлена на рис. 4.32. Насіння рицини мають дуже крихку оболонку і високоолійне ядро з дуже малою механічною міцністю. Зважаючи на ці специфічні особливості насіння рицини попередньо перед обрушенням пропонують кондиціонувати (підсушувати) до вологості 7,0 - 8,0% і сортувати за розмірами на три сорти. Обрушення насіння, сепарування отриманої рушанки, і попереднє грубе подрібнення ядра доцільно проводити в комбінованій машині - шельмашині. Поєднання трьох операцій в

одній машині скорочує час контакту оболонки з частково зруйнованим високоолійним ядром, що знижує втрати олії у виробництві. Відкаліброване насіння рицини з приймального бункера 1, елеватором 2 зі спеціальними ковшами подається в бункер шельмачини 3. Насіння з бункера через що живить валик надходять в однопарні вальці 4 в зазор між валками, де здійснюється їх обрешення. Щоб зберегти цілісність ядра насіння, зазор між валками встановлюється на 0,5 - 1,0 мм менше

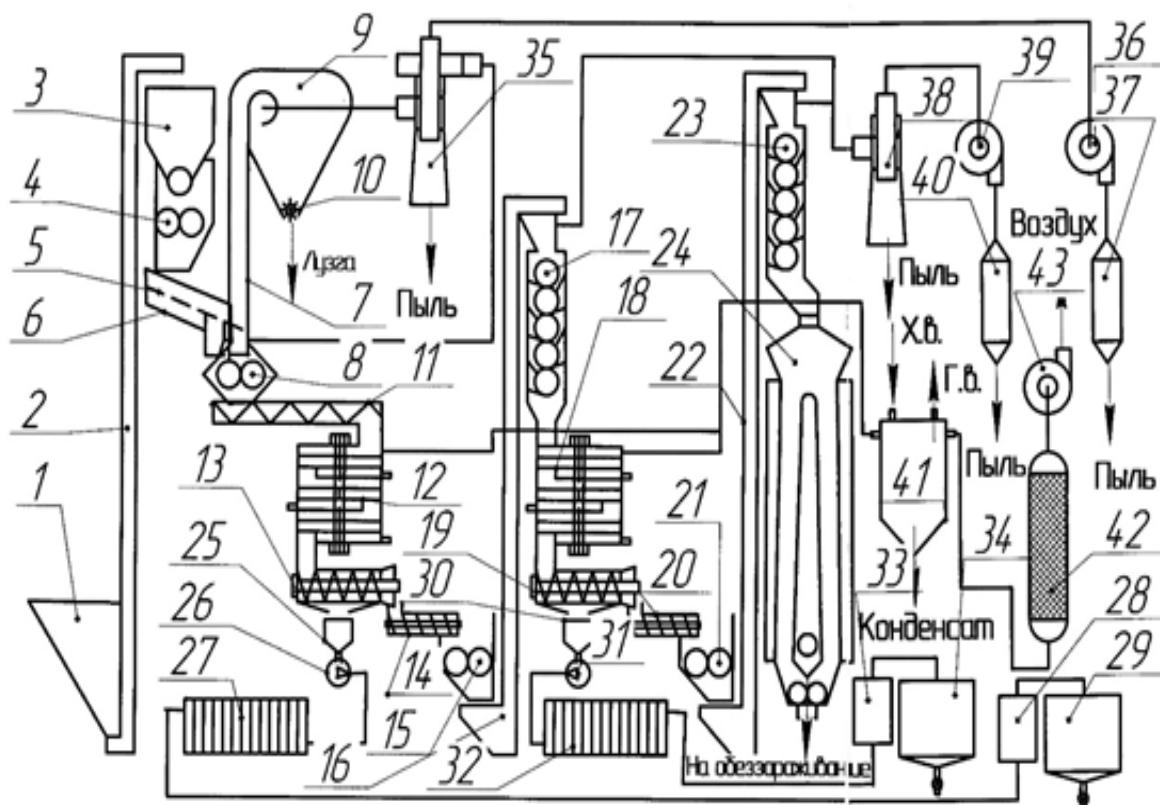


Рис. 4.32. Технологічна схема переробки насіння рицини

1 - приймальний бункер, 2 - елеватор, 3 - бункер шельмачини, 4, 8, 15, 21 - однопарні вальці, 5 - решето, 6 - днище, 7 - пневмосепаруючий канал, 9 - осадова камера, 10 - вакуумний затвор, 11 - шнек-інактиватор, 12 - багаточанна жаровня, 13 - форпрес, 14, 20 - ломальний шнек, 16, 22 - норія, 17, 23 - п'ятивалковий верстат, 18 - багаточанна жаровня, 19 - експеллерний прес, 24 - охолоджувальна колонка, 25, 30 - здвоєний гущеловлювач, 26, 31 - насос, 27, 32 - фільтр-прес, 28, 33 - трубчастий теплообмінник, 29, 34 - бак, 35, 40 - регульований циклон, 36, 39, 43 - центробіжний вентилятор, 37 - рукавний фільтр, 38 - циклон, 41 - теплообмінник, 42 - адсорбер.

Відокремлена лузга підхоплюється струменем повітря, що створюється вентилятором 36 і несеться в відцентрову осадочну камеру 9 шельмадини, де за рахунок відцентрових сил і збільшення обсягу осідає і виводиться через вакуумний затвор 10 за межі шельмадини. Лузжистість ядра не повинна перевищувати 8,0 - 10,0%, винос ядра в оболонку 0,3 - 0,4%, олійність лушпиння не більше 1,5 - 1,8%.

Лушпиння з осадової камери 9 через прохід з решета шельмадини пневмотранспортом подається в приймальний бункер парового котла для дії технологічного пара.

Насіння рицини мають найбільш активну (порівняно з іншими олійними культурами) липазу, тому після подрібнення ядра необхідно проводити інактивацію ферментного комплексу, для чого використовується шнек-інактиватор 11. інактивації ферментної системи отриманої м'ятки необхідно виробляти зволоженням і нагріванням протягом 30 - 40 з насиченим гострим паром до вологості 9,0 - 10,0% і температури 85 - 90 ° С. При цьому кислотне число пресових олій знижується в середньому на 0,6-0,8 мг КОН порівняно з оліями, які отримують із застосуванням традиційного методу.

Зі шнека-інактиватора м'ятка надходить в багаточанну жаровню 12. У верхньому чані жаровні вологість м'ятки доводять до 13,0 - 13,5%. Зволожену м'ятку піддають подальшій тепловій обробці в самопропарюючих шарах товщиною 350 - 450 мм з доведенням вологості при вході в прес до 5,0 - 6,0% і температури 100 - 105 ° С. Тривалість жаріння мезги при нормальному заповненні жаровень повинна становити 45 - 60 хв. Тиск пару в жаровні повинен бути 0,5 МПа. Відведення вологи з жаровні проводиться за допомогою природної аспірації через витяжні труби, не допускаючи підсмоктування повітря в чани жаровні.

Попереднє віджимання мезги проводиться на форпресі 13. Величина зазору між зєєрними пластинами повинна становити: на I ступені - 1,5 мм, на II - 1,0, на III - 0,75 і на IV - 0,45 мм, частота обертання шнекового вала 18 об / хв. Оліїстість черепашки на виході з форпрес 17 - 20%, вологість форпресової макухи 6 - 6,5%.

Подрібнення форпресової макухи здійснюють послідовно в шнеку 14 для макухи, однопарними вальцями 15 і на п'ятивалковому верстаті 16. Подрібнена форпре-

сова макуха за ступенем подрібнення повинна бути максимально однорідною з вмістом проходу через одноміліметрове сито не менше 80%. Подачу попередньо подрібненої форпресової макухи здійснюють норією 16. П'ятивалковий верстат 17 встановлюється над багаточанною жаровнею 18 експеллерному пресі 19.

Подрібнена форпресова макуха подається в верхній чан експеллерної жаровні 18. У верхньому чані жаровні шнековими форпресами мезга піддається вторинному зволоженню до 7 - 7,5% водою, і насиченим гострим паром. Зволожена м'ятка проходить подальшу теплову обробку в самопропарюючихся шарах товщиною 250 - 350 мм з доведенням вологості при вході в прес до 3,7 - 4,2% і температури 115 - 120 ° С. Тривалість жаріння мезги при нормальному заповненні жаровень повинна становити 45 - 60 хв. Відведення зайвої вологи з другого і третього чанів регулюють засувками витяжних вікон без примусової вентиляції.

Остаточне віджимання проводиться в експеллерному пресі 19. Зазор між зерними пластинками (мм): I секції - 0,8 - 1,0; II секції - 0,5 - 0,7; III секції - 0,25; IV секції - 0,15. Частота обертання шнекового вала 4,5 - 5,5 об / хв. Олійність макухи при фактичній вологості, не вище 6,0%.

Форпресова олія з преса 13 надходить в здвоєний гущеуловлювач 25, з якої насосом 26 подається в фільтрпреси 27 та далі в трубчатих теплообмінниках 28, в бак 29 складу готової продукції. Експеллерна олія з преса 19 надходить в здвоєний гущеуловлювач 30, з якого насосом 31 подається в фільтрпрес 32 та далі в трубчатий теплообмінник 33, бак 34 складу готової продукції. Фільтрацію рицинової олії слід проводити при 90 - 95 ° С і тиску 0,2 - 0,3 МПа через два шари бельтинга ГОСТ 332. Отримане за такою схемою очищення, олія містить 0,1 - 0,25% вагового відстою і не більше 0,09% фосфору в перерахунку на стеароолецітін, що дозволяє повністю відмовитися від парової гідратації.

Для уловлювання пилу насіння рицини передбачена напівзамкнута система очищення повітря в шельмашині 4-10. Для поділу потоку застосовується регульований циклонний апарат РЦР 35 з додатково влаштованим равликову роздільником потоку. Запилене повітря аспірується з центробіжної осадової камери шельмашини і направляється в регульований циклонний апарат. Тут відділяється понад 91% пилу і

проходить поділ потоку на дві частини. Один потік повертається в пневмосепараційний канал шельмашини, а інший потік подається відцентровим вентилятором 36 на другу сходинку очищення - рукавний фільтр 37. Ступінь очищення в рукавному фільтрі понад 96%.

Відсмоктування повітря від решти устаткування, що виконує механічні процеси переробки насіння рицини, відбувається вентилятором 39 з дво-хступенчатим очищенням повітря в циклон апараті 38 і рукавному фільтрі. 40.

Таким чином, застосування напівзамкнутої системи очищення повітря в шельмашині з використанням регульованого циклонного апарата з додатково влаштованим равликосим поділом потоку, двоступенева очистка повітря при механічній обробці насіння рицини циклон і матерчатий фільтр, а при вологотепловій обробці трубчастий теплообмінник і адсорбер з активованим вугіллям забезпечує надійний захист навколишнього середовища.

Відсмоктування пароповітряної суміші з жаровень 12 і 18 здійснюється вентилятором 43 і проходить двоступінчате очищення конденсацією парів в трубчастий теплообмінник 41 і адсорбере 42 з активованим вугіллям.

Таким чином, переробки рицини за запропонованою технологією відповідно до розробленої технологічної схеми адаптованої до малотоннажного підприємства дозволить забезпечити виробництво продукції високої якості.

4.4. Розробка технологічної схеми детоксикації рицинової шроту і макухи

Одержуваний при виробництві віджимання - екстракція шрот, а при двохступінчатому віджиманні макухи є цінними кормовими продуктами. Так в шроті олійність становить 1,34 - 2,81%, вміст в ньому протеїну досягає 41,00 - 50,00%, золи 4,30 - 10,70%, клітковини 24,60 - 37,50, безазотистих екстрактивних речовин 41,00 - 50,00%. Однак, шрот і макуха рицини недопустимі для годівлі сільськогосподарських тварин через наявність в ньому рослинного токсабульміна - рицину і алкалоїду - рицинин. За

біологічними властивостями рицин є клітинною отрутою, що інгібує ензітичну активність деяких систем. Рицин відрізняється високою токсичністю. Особливо він отруйний для теплокровних тварин.

Подібно до інших токсинів, рицин здатний викликати аглютинацію червоних кров'яних тілець. Денатурація рицину при нагріванні супроводжується поті-втратаю їм токсичних властивостей. Найбільш часто для знешкодження шроту використовується вологотеплова обробка в чанних тостерах не менше 1,5 - 2,0 год при початковій вологості 24 - 26% і кінцевої температурі не нижче 1350. Обробка вважається закінченою при негативній пробі на рицин. Рицинин набагато легше знешкоджується, тому при знешкодженні рицину, вважається повністю знешкодженим і рицинин. Жорсткі режими вологотеплової обробки різко знижують перетравність і засвоюваність білків, викликаючи гідроліз незамінних дефіцитних амінокислот, перш за все лізину і метіоніну. Зниження розчинності білків є наслідком їх денатурації. Крім того, при жорсткій вологотепловій обробці відбувається реакція меланоїдіноутворення - взаємодії білків і вуглеводів, в результаті чого погіршується амінокислотний склад білків. Різко знижується якість макухи або шроту, як високобілкових кормових добавок.

З огляду на, що застосовуються в даний час способи знезараження рицинової шроту складні і енергоємні, а також їх застосування не завжди дає повне знешкодження, вкрай важливою є розробка хімічного способу знезараження шроту і макухи рицини з метою їх використання на корм тварин. У зв'язку з цим певний інтерес представляють дослідження при обробці шроту лужними розчинами аміаку або гідроксиду натрію. Після такої обробки досягається майже повна детоксикація шроту. Принциповою відмінністю такого способу обробки є знезараження доводорозчинної фракції білка рицину гідролізом, а не денатурацією білка. Можлива хімічна обробка знешкоджує гідролізом і білково-полісахаридних фракцію алергену. На жаль, в даних дослідженнях затримання алергену не визначалася. В інституті механізації тваринництва були проведені дослідження хімічних способів знезараження шроту рицини з метою його подальшого використання в годуванні тварин. Для визначення ступеня детоксикації шроту використовували реакцію аглютинації еритроцитів. Для визначення токсичності

шроту, різних способів знезараження проводилося підшкірне введення екстракту досліджуваного зразка шроту кроликам. Кращі результати були отримані при обробці рицинової шроту 40% розчином їдкого натрію в кількості 4 - 5% від маси шроту за рахунок витримки обробленого шроту протягом 5 - 7 діб. Вивчення перетравності поживних речовин раціонів при включенні 33,6 - 33,8% рицинової шроту обеззараженого хімічним методом показало, що застосування їдкого натрію підвищує перетравність протеїну, жиру і золи в порівнянні з використанням кальцинованої соди.

Отримані результати дозволили авторам статті розробити технологічну лінію по знешкодженню рицинової макухи хімічним способом. Технологічна схема детоксикації рицинової макухи представлена на рис.4.31.

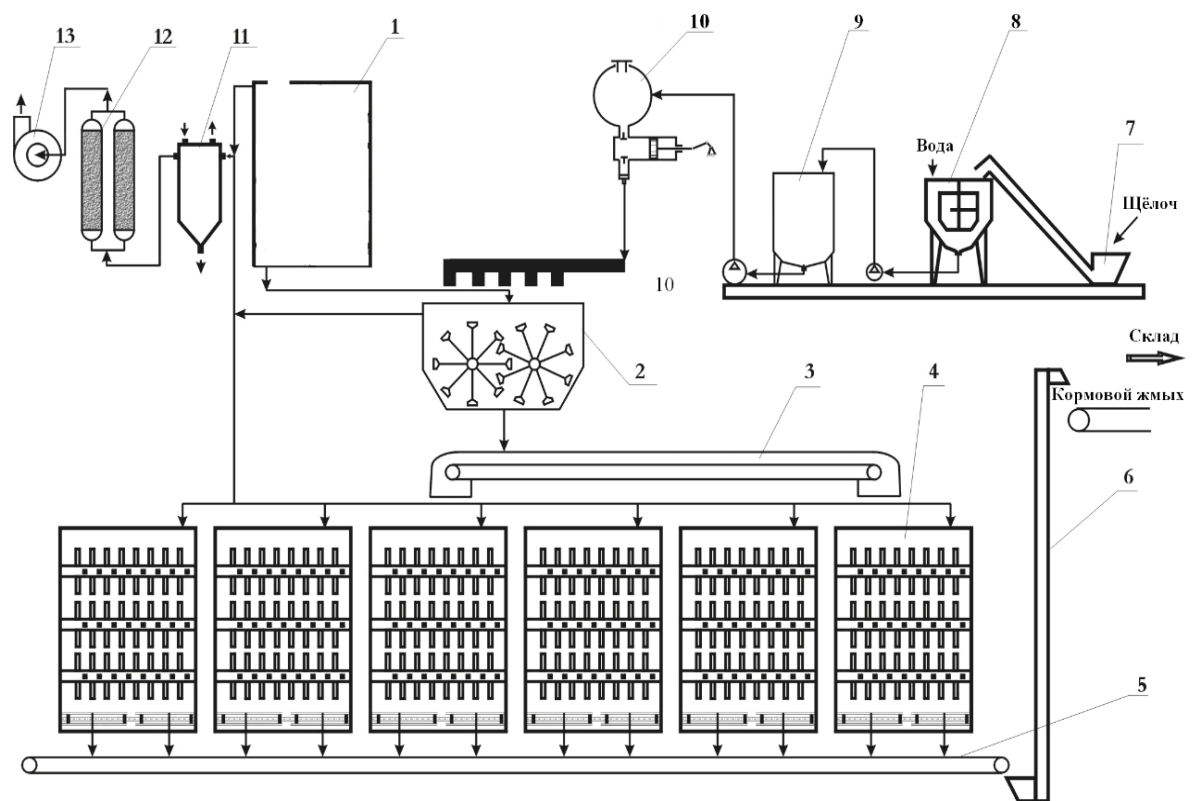


Рис. 4.33. Технологічна схема детоксикації рицинової макухи: 1 - приймальний бункер, 2 - змішувач, 3 - роздатковий транспортер, 4 - бункер -детоксикатор, 5 - складальний транспортер, 6 - норія, 7 - загрузочний транспортер, 8 - змішувач, 9 - накопичувальна ємність, 10 - насос-дозатор, 11 - т рубчастий теплообмінник, 12 - адсорбер з активованим вугіллям, 13 - відцентровий вентилятор.

Подрібнена, охолоджена макуха надходить в приймальний бункер 1 лінії детоксикації. Далі макуха подається в змішувач СКО-Ф-3 2, куди подається 40% розчин в кількості 4 - 5% від маси макухи. Тут сухий порошок луку подається транспортером 7 в змішувач 8, де готується розчин, який надходить в накопичувальну ємність 9, а потім насосом-дозатором 10 розпилюється в змішувачі СКО-Ф-3 2. Готова суміш роздатковим транспортером 3 подається в один з бункерів-детоксикатор 4. Тут протягом 5 - 7 діб при температурі 55 - 600 відбувається гідролізація рицину і рициніну. Готова макуха після охолодження подається в збірний транспортер 5, а звідти через норію 6 на склад готової продукції або в транспортний засіб безпосередньо замовнику.

Відсмоктування пароповітряної суміші з системи детоксикації здійснюється вентилятором 13 і проходить двоступеневу очистку конденсацією парів в трубчастому теплообміннику 11 і в адсорбері 12 з активованим вугіллям.

4.5. Висновки до розділу 4

1. Пропонована технологія зі шнеком-інактиваторами паровими жаровнями двоступінчатим віджиманням дозволяють на міні-заводах відмовитися від екстракції і отримувати рицинову олію високої якості, а гідроксилу натрію з по-наступною витримкою отримати високобілкову кормову добавку і знизити енергоємність процесу.

2. У запропонованій технології за рахунок введення додаткових операцій перед обрушенням: кондиціонування вологості насіння 7,0-8,0% і сортуванням їх за розмірами на три сорти, а також поєднання з шельмашиною третини операції грубого подрібнення і оптимізація процесу сепарування рушанки знижують втрати олії у виробництві.

3. Технологічні розрахунки показали, що запропонована технологія при початковій олійності насіння рицини 55% дозволить отримати вихід форпресової олії 48,66%, експелерної олії 1,49%, з втратою олії в макусі 1,49% і в лушпинні 0,31%. Вихід макухи 24,77%, лузги 15,53%. Вміст лушпиння в макусі 8-10%.

4. Застосування напівзамкненої системи очищення повітря в шельмашині із

використанням користуванням регульованого циклонного апарата з додатковим равликовим поділом потоку, двоступеневою очисткою повітря при механічній обробці насіння рицини циклоном і матерчатим фільтром, а при вологотепловій обробці трубчастий теплообмінник і адсорбер з активованим вугіллям забезпечують надійний захист навколишнього середовища.

5. За нашими даними конструкція шельмашин, виготовлених за кресленнями СКБ «Продмаш», дозволила досягти великого знімання лушпиння. Однак збільшення знімання лушпиння до 7-10% призводить до зростання його олійності до 3,5-4,3%. Це виправдало відмову відділення лузги взагалі. Тому в пропонованій технології ми ввели додаткові операції перед обрушенням: кондиціонуванням вологого насіння до 7,0-8,0%, і сортуванням його за розмірами на три сорти, а також поєднання в шельмашині третин операції грубого подрібнення. Крім цього, для зниження олійності відділень неушкодженого лушпиння проведена оптимізація процесу сепарування рушанки на решеті і в вертикальному пневмосепаруючому каналі.

6. Технологічні розрахунки показали, що запропонована технологія переробки при початковій олійності насіння рицини 55% дозволить отримати вихід форпресової олії 48,66%, експеллерної олії 1,49% з втратою олії в макусі 1,49% і в лушпинні 0,31%. Вихід макухи 24,77%, лузги 15,53.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Головними підсумками виконаної роботи є такі результати:

1. На основі експериментального методу визначення потенціалу масопереносу та ізотермічної масоємності отримано основні залежності термодинамічних характеристик ядра, рушанки, лушпиння і 10%-ного вмісту лушпиння в ядрі рицини; визначено 12 рівнянь регресії, використані при розробці та численних дослідженнях математичних моделей процесу смаження олійної сировини.

2. Проведеними експериментальними дослідженнями ізотерм сорбції (десорбції) елементів насіння рицини встановлено, що при однаковому тиску пари, що подається для зволоження рушанки, час необхідний для її зволоження у відповідній вологості при процесі смаження буде менше в тій рушанці, де відсоток лушпиння буде більшим.

3. Проведеними експериментальними дослідженнями енергії зв'язку вологи елементів насіння рицини встановлено, що чим більше в рушанці рицини буде присутнє лушпиння, тим більше необхідно енергії на відрив 1 молу води і тим менше часу буде витрачено на сушіння в процесі смаження.

4. Проведеними експериментальними дослідженнями комплексних показників ефективності технологічних процесів переробки рицини встановлено, що при зволоженні м'ятки до $W_{к.з.} = 11\%$, і сушіння до $W_{к.с.} = 6,25\%$ гріючою парою при тиску $P_{гр} = 3$ атм. (Різниця вологості між зволоженням і сушінням м'ятки рицини $\Delta W = 4,75\%$) виходить велика кількість олії $m_{ол} = 60$ гр, фузи - $m_{ф} = 12$ гр.

5. При проведенні експериментальних досліджень нами вперше були отримані рівняння стану середовища, що зв'язують компоненти напруги та деформації, а також залежності коефіцієнтів пористості від напруги при різних експозиціях, радіальні коефіцієнти фільтрації при різному ступені стиснення, дозволяють замкнути системи рівнянь математичних моделей процесів фільтрації олії та консолідації мезги, перевірити адекватність отриманих математичних моделей, а також обґрунтувати раціональні режими та конструктивні параметри необхідного технологічного обладнання.

6. Вперше в основу проведених експериментів з процесів пресування та фільтрації масла через шари мезги в шнекових пресах покладена теорія консолідації, розглянуто одночасний перебіг процесів пресування та фільтрації, з урахуванням деформації «скелета» мезги та взаємного переміщення обох її фаз.

7. Результатами порівняльного аналізу численних та експериментальних досліджень процесів пресування та фільтрації доведено адекватність розроблених математичних моделей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГОСТ 6757-96 Масло касторовое техническое. Технические условия. [чинний 1997-01-01] Вид. офіц. Київ, 1997. 8 с. (Інформація та документація).
2. Створити наукові основи глибокої перегобки та використання біосировини для енергетичного і кормового забезпечення виробництва тваринницької продукції, Розробити математичну модель фільтрації рицинової олії крізь шар мезги у шнековому пресі: звіт про НДР / Запоріжжя. Національна академія аграрних наук. Інститут механізації тваринництва; наук. керівник В.А. Дідур. ІМТ НААН. Запоріжжя, 2010. 11 с.
3. Створити наукові основи глибокої переробки та використання біосировини для енергетичного і кормового забезпечення виробництва тваринницької продукції. Розробити технологічний регламент та вихідні вимоги на комплект обладнання для малотонажного підприємства з перероблення рицини. Розробити тимчасовий технологічний регламент переробки рицини на малотонажному підприємстві : звіт про НДР / Запоріжжя. Національна академія аграрних наук. Інститут механізації тваринництва; наук. керівник В.А. Дідур. ІМТ НААН. Запоріжжя, 2010. 52 с.
4. Створити наукові основи глибокої переробки та використання біосировини для енергетичного і кормового забезпечення виробництва тваринницької продукції. Розробити програму і методики експериментальної перевірки адекватності математичних моделей процесів волого-теплової обробки, віджимання мезги та фільтрації касторової олії крізь шар мезги у пресі: звіт про НДР / Запоріжжя. Національна академія аграрних наук. Інститут механізації тваринництва; наук. керівник В.А. Дідур. ІМТ НААН. Запоріжжя, 2010. 28 с.
5. Створити наукові основи глибокої переробки та використання біосировини для енергетичного і кормового забезпечення виробництва тваринницької продукції. Провести уточнення математичних моделей процесів волого-теплової обробки й віджимання насіння рицини та виконати перевірку їх адекватності за результатами експериментальних досліджень. Розробити математичну модель віджимання мезги насіння рицини у шнековому пресі : звіт про НДР / Запоріжжя. Національна академія аграрних наук. Інститут механізації тваринництва; наук. керівник В.А. Дідур. ІМТ

НААН. Запоріжжя, 2009. 20 с.

6. Дідур В. В. Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння рицини в умовах малотоннажного підприємства: дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 05.05.11. Мелітополь, 2021. 398 с.

7. Розробка технології використання і створення експериментальних зразків для виробництва та переробки рицини на енергетичну біосировину та раціональне використання продуктів її конверсії. Удосконалення технології та технічних засобів переробки олійної біосировини: звіт про НДР / НДІ Механізації землеробства півдня України Таврійського державного агротехнологічного університету; наук. керівник Д. П. Журавель. Мелітополь, 2012. 48 с.

8. Розробка технології використання і створення експериментальних зразків для виробництва та переробки рицини на енергетичну біосировину та раціональне використання продуктів її конверсії. Дослідження процесу розділення діелектричних суспензій в біжучому електричному полі: звіт про НДР / НДІ Механізації землеробства півдня України Таврійського державного агротехнологічного університету; наук. керівник Д. П. Журавель. Мелітополь, 2014. 45 с.

9. Розробка технології використання і створення експериментальних зразків для виробництва та переробки рицини на енергетичну біосировину та раціональне використання продуктів її конверсії. Розробка технологій й технічних засобів очищення та утилізації робочих і харчових рідин силовими полями: звіт про НДР / НДІ Механізації землеробства півдня України Таврійського державного агротехнологічного університету; наук. керівник Д. П. Журавель. Мелітополь, 2015. 38 с.

10. Дідур В.В., Чебанов А.Б., Дідур В.А., Назарова О.П., Верещага О.Л. Оптимізація конструктивно-технологічних параметрів гвинтового преса для віджимання мезги насіння рицини (на прикладі одного витка гвинтового вала). Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Кропивницький, 2019, Вип. 2(33). С. 34-43.

11. Дидур В.А., Ткаченко, А.В., Ткаченко, В.А., Дидур В.В. Математическая модель кондуктивного и конвективного тепло- и массопереноса в многочанной жаровне / В.А. Дидур, В.А. Ткаченко, А.В. Ткаченко, В.В. Дидур // Вісник Українського відді-

лення Міжнародної академії аграрної освіти Вип. 4. Мелітополь: Копіцент «Документ-сервіс», 2016. С.14-31.

12. Дидур В. В., Ткаченко, А.В., Ткаченко, В.А., Дидур В.В. Математическая модель процесса подготовки масличного сырья в многочанной жаровне. MOTROL Commission of motorization and energetics in agriculture an international journal on operation of farm and agri-food industry machinery. Vol. 18, No 1. LUBLIN – RZESZÓW 2016. С.29-36.

13. Дидур В.А., Ткаченко А.В. Термодинамические характеристики элементов семян подсолнечника. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. 2016. Вип. 251. С. 19 – 30.

14. Liua J., Abdalbasit M., Gasmallaa A., Lia P., Yang R. Enzyme-assisted extraction processing from oilseeds: Principle, processing and application. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2016. Vol. 35. P. 184–193.

15. McKeon Th. A., Brandon D. L., He X. Improved method for extraction of castor seed for toxin determination. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2016. Vol. 5. P. 56–57.

16. McKeon Th. Fractionation of insect oils: the case of yellow mealworm oil. International News on Fats, Oils, 2016. Vol. 27. P. 20 – 24.

17. Mckeon T. A., Brandon D. L., He X. Improved method for extraction of castor seed for toxin determination Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2016. Vol. 5. P. 6–57.

18. Awab W., Harbawy A.L., Mozahim K. Production and Characterization of Biodiesel from seed oil of Castor (*Ricinus communis* L.) plants. International Journal of Science and Technology. 2014. Vol. 3. No. 9. P. 78–85.

19. Mckeon T.A., Hayes D. G., Hildebrand D. F., Weselake R. J. Castor (*Ricinus communis* L.). Industrial Oil Crops. Amsterdam, Netherlands, Academic press and Champaign-Urbana, IL, USA, AOCS, 2016. P. 75 – 112.

20. Mckeon T.A., Hayes D. G., Hildebrand D. F., Weselake R. J. Introduction to industrial crops. Industrial Oil Crops. Amsterdam, Netherlands, Academic press and

Champaign-Urbana, IL, USA, AOCS, 2016. P. 1– 13

21. Liu, J. Enzyme-assisted extraction processing from oilseeds: Principle, processing and application [Text] / J.Liu, A.A. Gasmalla, P.Li, R. Yang // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2016. – Vol. 35. – P. 184 – 193. doi: 10.1016/j.ifset.2016.05.002

22. Mc Keon, T.A. Improved method for extraction of castor seed for toxin determination [Text] / T.A. McKeon, D. L. Brandon, X. He // *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2016. Vol. 5. P. 56 – 57. doi: 10.1016/j.bcab. 2015. 12.007

23. Tzompa-Sosa, D. Fractionation of insect oils: the case of yellow meal-worm oil [Text] / D. Tzompa-Sosa, W. University, M. Verbreek, H. van Valenberg // *INFORM: International News on Fats, Oils, and Related Materials*. 2016. Vol. 27, Issue 7. P. 24 – 27. doi: 10.21748/inform. 07.2016.24

24. Al-Harbawy, A.W. Production and Characterization of Biodiesel from seed oil of Castor (*Ricinus communis* L.) plants [Text] / A. W. Al-Harbawy, M.K. AL-Mallah // *International Journal of Science and Technology*. – 2014. – Vol. 3, Issue 9. – P. 508 – 513

25. McKeon, T. A. Castor (*Ricinus communis* L) [Text] / T. A. McKeon // *Industrial Oil Crops*. – 2016. – P. 75 – 112. doi: 10.1016/ b978-1-896997-98-1.00004-x.

26. Алексанян, И. Ю., Титова Л.М., Нугманов А.Х. Моделирование процесса сушки дискретного материала в кипящем слое [Текст]. *Техника и технология пищевых производств*. 2014. №3. С. 96 – 102.

27. Рудобашта, С. П. Сушка дисперсных материалов. Пленарные доклады 2002. Т.1. С. 26 – 35.

28. Шевцов, А. А. Аналитическое решение математической модели связанного теплопереноса при конвективной сушке зерна. *Известия вузов. Пищевая технология*. 2010. №4. С. 99 – 104.

29. Дідур В.В., Верещага А.Л. Методика вимірювання зусилля у гвинтовому пресі при віджимі олії з рослинної сировини. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. ТДАТУ імені Дмитра Моторного*. Мелітополь: ТДАТУ імені Дмитра Моторного, 2019. Вип. 19, т. 2. С.41-47.

30. Дідур В.В., Чебанов А.Б., Дідур В.А., Верещага О.Л., Назарова О.П. Оптимізація конструктивно-технологічних параметрів гвинтового преса для віджимання мезги

насіння рицини. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. ТДАТУ імені Дмитра Моторного. Мелітополь: ТДАТУ імені Дмитра Моторного, 2019. Вип. 19, Т. 4. С. 21-32.

31. Дідур В. В., Дідур В. А., Назаренко І. П., Назарова О. П., Діденко О. В. Моделювання процесу очищення пресової касторової олії методом флотації. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. 2018, Вип. 297 С. 91-96.

32. Дідур В.В., Дідур В.А., Чебанов А.Б., Асєєв А.А. Оптимізація параметрів волого-теплової обробки м'ятки при виділенні олії із насіння рицини. Науковий вісник ТДАТУ: Електронне наукове фахове видання. Мелітополь: ТДАТУ, 2018. Вип.8. Т.2., С.1-8 (DOI: 10.31388/2220-8674-2018-2-14).

33. Дідур В. А., Ткаченко В.А., Ткаченко А. В., Дідур В.В., Асєєв А.А. Моделювання гідродинамічних процесів в багаточанній жаровні при смаженні мятки рицини. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ, 2017. Вип. 262.С.11-25.

34. Дідур В. А., Дідур В.В. Механико-технологические проблемы глубокой переработки растительного сырья клещевины в условиях малотоннажного производства. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». 2016. Вип. 10/1. С. 116-121.

35. Дідур В.В., Чебанов А. Б., Асєєв А. А., Шарій А. В. Термодинамічні характеристики елементів насіння рицини. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ, 2016. Вип. 254. С.278-286.

36. Дідур В.А., Назаренко І.П., Дідур В.В. Методика проектування технологічних комплексів для очищення рослинних олій. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2016. Вип. 16, Т. 2. С.224- 232.

37. Ткаченко А.В., Дідур В.В., Дідур В.А., Ткаченко В.А. Математическая модель влаготепловой обработки мятки семян масличных культур в многочанной паровой жаровне. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2012. Вип. 12, Т.1. С. 23-35.

38. Дидур В.А., Ткаченко В.А., Ткаченко А.В., Дидур В.В. Математическая модель процесса консолидации при маслоотделении в шнековом прессе. Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Луганськ, 2012. №35 С. 99 – 112.
39. Дидур В. А., Ткаченко В.А., Ткаченко А.В., Дидур В.В. Влияние противотоков в шнековом прессе на эффективность его работы. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету Мелітополь, 2011. Вип. 11, Т.4. С. 20-34.
40. Ткаченко В.А., Дидур В.А., Ткаченко А.В., Дидур В.В. Моделирование процесса отжима мезги масличных семян в шнековых пресах. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2011. Вип. 11, Т.2. С. 3- 14.
41. Ткаченко А.В., Дидур В.В., Дидур В.А., Ткаченко В.А. Математическая модель процесса сепарации рушанки семян клещевины в шельмашине. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. ТДАТУ, 2011. Вип. 1, Т. 2. С.37-47.
42. Дідур В.А., Дідур В.В., Вороновський І.Б. Вплив забрудненості дизельного палива на ефективність використання машинно-тракторних агрегатів (МТА). Праці ТДАТА. Мелітополь, 2005. Вип. 33. С.3-13.
43. Didur V., Tkachenko V., Tkachenko A., Didur V., Aseyev A. Modeling of the process of oilseed meat cooking in a multi-vat cooker during processing of oil raw materials. Eastern-European journal of enterprise technologies. 2017. 3/8 (87). P.46-54.
44. Дидур В., Ткаченко В., Ткаченко А. Математическая модель процесса подготовки масличного сырья в многочанной жаровне. MOTROL Commission of motorization and energetics in agriculture an international journal on operation of farm and agri-food industry machinery. LUBLIN, RZESZÓW, 2016. Vol. 18, No 1. С.29-36.
45. Дидур В.А., Ткаченко В.А., Ткаченко А.В., Дидур В.В. Моделирование процессов, протекающих в шнековом прессе при консолидации мезги масличных культур. Известия МААО. 2013 (1). № 16. С.150-155.
46. Дидур В.А., Дидур В.В., Ткаченко В.А., Ткаченко А.В., Верещага А.Л. Проектирование винтового пресса для отжима растительных масел методом подобия. Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти. Херсон: ОЛДІ-

ПЛЮС, 2018. Вип. 6. С. 7-21.

47. Дидур В.А., Ткаченко В.А., Ткаченко А.В., Дидур В.В., Верещага А.Л. Структурно-механические свойства мезги семян масличных культур. Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти. ОЛДІ-ПЛЮС, 2017. Вип. 5. С.7-24.

48. Дидур В.А., Ткаченко В.А., Ткаченко А.В., Дидур В.В. Математическая модель кондуктивного и конвективного тепло- и массопереноса в многочанной жаровне. Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти. Мелітополь: Копіцентр «Документ-сервіс», 2016. Вип. 4. С.14-31.

49. Didur V., Kyurchev V., Chebanov A., Aseev A. Increasing the efficiency of the technological process of processing castor-oil seeds into castor oil. Modern Development Paths of Agricultural Production. Springer Nature Switzerland AG. - 2019. P.17-28 (DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_3).

50. Didur V., Chebanov A., Didur V., Aseev A. Foundation of operating practices of seed meal moisture and heat treatment on oil extraction from castor beans. Journal of Agriculture and Environment. 2017. Vol 1. № 1. P.9-15.

51. Didur V., Tkachenko V., Tkachenko A., Didur V., Vereshchaga A. Vereshchaga Rheology of the pulp of castor-oil seeds and its effect on the process of pressing. ADVANCES OF SCIENCE: Proceedings of articles the international scientific conference. Karlovy Vary, Kyiv: MCNIP, 2018. P. 609-618.

52. Електрофлотаційна установка для очищення рослинної олії: пат. 188846 Україна: МПК С11Вс/02; заявл. 12.02.2019; опубл. 25.11.2019, Бюл. № 24. 6 с.

53. Спосіб отримання рослинної олії високої якості: пат. 129046 Україна: МПК С11Вс/02; заявл. 13.02.2018; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 5 с.

54. Спосіб очищення рослинної олії: пат. 127279 Україна: МПК В30В9/02; заявл. 05.02.2018; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 8. 6 с.

55. Пристрій для дослідження процесу відділення олії з насіння олійних культур методом пресування: пат. 118672 Україна: МПК В30В9/02; заявл.27.12.2016; опубл. 28.08.17, Бюл. №16. 6 с.

56. Пристрій для дослідження процесу відділення олії з рослинної сировини: пат. 115325 Україна: МПК С11В 1/02; заявл. 07.11.2016; опубл. 10.04.2017, Бюл. №7. 5 с.

57. Спосіб дослідження процесу відділення олії з рослинної сировини: пат. 114607 Україна: МПК С11В1/04; заявл. 03.10.2016; опубл. 10.03.17, Бюл. № 4 с .
58. Електричний фільтр і спосіб його регенерації: пат. 37109 Україна № 2000031620; заявл. 22.03.2000; опубл. 16.04.2001, Бюл. № 3. 3 с.
59. Наукові основи глибокої переробки насіння рицини на олію та високобілкові корми: звіт про НДР (заключний) / ТДАТУ; кер. В. А. Дідур. Мелітополь, 2018. 300 с.
60. Дідур В.А., Зубкова К.В. Аналіз і дослідження фізико–механічних властивостей насіння рицини. Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Вип.19, Мелітополь: ТДАТА, 2004. С. 18-21.
61. Розробка технології, експериментального устаткування технологічної лінії по глибокій переробці насіння рицини в касторову олію для виробництва мастил для сільськогосподарської техніки: звіт про НДР; кер. В. А. Дідур. Мелітополь: ТДАТА, 2005. 99 с.
62. Чебанов А.Б. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневмо-сепаратора рушанки рицини з пиловловлюючим пристроєм: дис... канд. техн. наук. Мелітополь, 2013. 188 с.
63. Журавель Д. П., Чебанов А. Б., Верещага О. Л. Вимоги до підготовчих операцій при пресуванні мезги насіння рицини. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Мелітополь, 2-27 листопада 2020 р.) / ТДАТУ. Мелітополь, 2020. С. 673-678.
64. Журавель Д. П., Чебанов А. Б., Верещага О. Л. Аналіз способів отримання олійних матеріалів із насіння рицини. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конф. (м. Мелітополь, 2-27 листопада 2020 р.) / ТДАТУ. Мелітополь, 2020. С. 77-82.
65. Nadikto V., Zhuravel D., Chebanov A., Verechaga O. Improving the efficiency of pressing the male of castor seeds in the screw press. Norwegian Journal of development of the international Science. 2021. Vol. 59, № 1. pp. 48-53. DOI: 10.24412/3453-9875-2021-59-1-48-53.
66. Журавель Д. П., Чебанов А. Б. Обґрунтування аеродинамічних властивостей вороху рицини. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: Наукове

фахове видання. – Мелітополь: ТДАТУ, 2021. Вип. 21, т. 2. С. 42-50. DOI: 10.31388/2078-0877-2021-21-2-42-50.

67. Журавель Д. П. Обґрунтування геометричних характеристик вороху рицини для процесів кормовиробництва. XI Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормо виробництві». НУБП України, «ІМААВ НААН України, м. Київ, м. Глеваха, 3–22 жовтня 2022 року. С. 33-35.

68. Журавель Д. П. Технології переробки насіння рицини дворазовим пресуванням. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» ТДАТУ, м. Запоріжжя, 01-25 листопада 2022 р. С.93-96.

69. Журавель Д. П., Бондар А. М. Обґрунтування технологій отримання рицинової олії. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» ТДАТУ, м. Запоріжжя, 01-25 листопада 2022 р. С.77-79.

70. Журавель Д. П. Використання відновлюваної біосировини в енергетичних цілях. Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві: X Міжнародна науково-технічна конференція, 4-23 жовтня 2021 року: матеріали конференції. Глеваха-Київ. 2021. С. 28-30.

71. Журавель Д. П. Дослідження аеродинамічних властивостей компонентів насіння рицини. Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв: Матеріали МНПК. Харків: ДБТУ, 2021. С. 411-413.

72. Дідур В. А., Зубкова К. В. Спосіб отримання безлузгового ядра насіння рицини. Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Вип.33, Мелітополь: ТДАТА, 2005. С.19-23.

73. Дідур В. В., Журавель Д. П., Шокарев О. М., В'юнник О. В., Комар А. С. Аналіз технологій отримання олії з олійних культур. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Мелітополь: ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 3. 10 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-3-18.

74. Zhuravel D. Determination of linear dimensions of boxes and thirds of individual castor

varieties. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 1. С63-76. DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-63-76.

75. Журавель Д. П. Обґрунтування технологічного процесу обрушення насіння рицини для потреб кормовиробництва. Матеріали XII-ї Науково-технічної конференції «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві», смт Глеваха Київської області – м. Київ, Україна, 2-20 жовтня 2023 року: матеріали конференції. Глеваха-Київ. 2023. С.69-71.

76. Журавель Д.П. Обґрунтування методу очищення біологічних олій в електричному полі. Збірник тез доповідей XIII-ї Науково-технічної конференції «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві», смт Глеваха Київської області – м. Київ, Україна, (01-18 жовтня 2024 року): матеріали конференції. Глеваха-Київ. 2024. С. 68-72.

77. Журавель Д.П., Дідур В.В. Моделювання процесу очищення рицинової олії в електричному полі. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції. «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (01–25 листопада 2024 року). Запоріжжя, 2024. С. 98-104.

78. Дідур В. В. Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння рицини в умовах малотоннажного підприємства: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.05.11. Мелітополь, 2021. 44 с.

79. Журавель Д.П., Петренко К.Г. Определение аналитической функции для расчета конструктивных параметров испарителя. Праці ТДАТА. Вип. 33. Мелітополь, 2005. С.79-84.

80. Журавель Д.П., Савченко О.Д., Мовчан С.І. Обґрунтування необхідності вдосконалення вивчення дисципліни «Гідропривод сільськогосподарської техніки». Збірник науково-методичних праць “Удосконалення навчально-виховного процесу в вищому навчальному закладі”. Мелітополь, 2006. С.45-50.

81. Журавель Д.П. Вплив фізико-хімічних властивостей біодизеля на роботу ДВЗ. Праці ТДАТУ. Вип. 8. Т. 2. Мелітополь, 2008. С. 104-108.

82. Дідур В.А., Журавель Д.П., Савченко О.Д., Мовчан С.І. Методичне вдосконалення викладення гідромеханічного тиску і дотичних напружень в реальній рідині. Праці

ТДАТУ. Вип. 8. Т.2. Мелітополь, 2008. С. 48-56.

83. Журавель Д.П., Петренко К.Г. Енерго-екологічні аспекти використання біопалива. Збірник наукових праць Міжнародної науково – практичної конференції «Екологічне підприємництво в АПВ». Мелітополь, 2008, № 2. С. 45-47.

84. Журавель Д.П., Юдовинський В.Б., Кюрчев С.В. Прогнозування ресурсу трибоспрямих мобільних сільськогосподарських агрегатів. Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Вип. 75, Харків, ХНТУСГ, 2008. С. 11-22.

85. Дидур В.А., Надикто В.Т., Журавель Д.П., Юдовинський В.Б. Особенности эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники при использовании биодизельного топлива. Тракторы и сельхозмашины. М. 2009. № 3. С. 3 - 6.

86. Журавель Д.П., Мітков Б.В. Ефективність експлуатації мобільної техніки на біодизелі. Практичний посібник аграрія «Agroexpert». Київ, №7-8 (12-13) 2009. С. 104-106.

87. Журавель Д.П., Дідур В.А. Критерії оцінки стійкості складових металів до зношування в середовищі біопалива. Збірник наукових праць «Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві» Випуск 1 (3,4) ІМТ УААН. Запоріжжя, 2009. С.329-332.

88. Журавель Д.П., Юдовинський В.Б., Кюрчев С.В. Вплив біопалива на знос матеріалів паливної апаратури двигунів мобільної техніки. Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2009. № 3. С.87-90.

89. Журавель Д.П., Юдовинський В.Б. Вплив меркаптанів біопалива на водневе зношування поверхонь тертя. Вісник Львівського НАУ: Агроінженерні дослідження. №13. Т.2. Львів, 2009. С. 182-189.

90. Журавель Д.П. Юдовинський В.Б. Знос матеріалів в середовищі біопалив. Праці ТДАТУ. Вип. 10. Т.2. Мелітополь, 2010. С. 77-90.

91. Журавель Д.П., Мурай С.В. Математическое моделирование рабочего процесса и определение экологических показателей дизеля Д-245 на номинальном режиме. Праці ТДАТУ. Вип. 10. Т.4. Мелітополь, 2010. С. 124-130.

92. Журавель Д.П., Юдовинський В.Б. Моделирование процесса изнашивания материалов трибосопряжений в среде биотоплива при периодической работе мобильной техники. Праці ТДАТУ. Вип. 10. Т.5. Мелітополь, 2010. С. 265-278.
93. Журавель Д.П., Кюрчев С.В. Порівняльна характеристика зносу та інтенсивності зношування матеріалів в середовищі біопалива і нафтового дизельного палива. Вісник Львівського НАУ: Агроінженерні дослідження, №14. Т.2. Львів, 2010. С.112-117.
94. Журавель Д.П., Юдовинський В.Б. Износ материалов деталей сопряжения типа вал-втулка продольного относительного перемещения в среде биотоплива. Праці ТДАТУ. Вип. 10. Т.10. Мелітополь, 2010. С. 76-86.
95. Журавель Д. П. Юдовинський В.Б. Диференціація зносу матеріалів пар тертя мобільної техніки, що працює на біопаливі [Електронний ресурс]. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь: ТДАТУ, 2011. Вип.1, Т.1. С.153-157.
96. Журавель Д.П., Зубкова К.В., Щепачова А.В. Особливості застосування біопалива для мобільних енергетичних засобів. Матеріали науково-практичної конференції «Актуальні проблеми дисциплін природничо-наукової підготовки сучасних інженерів». Херсон, ХДАУ, 2010. С.99-101.
97. Журавель Д.П., Шрамко С.В. Обґрунтування та розробка електротехнічного методу контролю зносу пар тертя в середовищі біопалива при триботехнічних дослідженнях. Матеріали науково-технічної конференції. Вип.9.Т.4. Мелітополь, 2010. С. 111-113.
98. Журавель Д. П. Юдовинський В.Б., Коломоец В.А. Моделирование процесса изнашивания прецизионных соединений топливных систем ДВС, работающих в среде биотоплива. Науковий вісник Луганського національного аграрного університету / ЛНАУ. Луганськ, 2011. № 29. С. 380-390.
99. Журавель Д. П. Юдовинський В.Б., Триботехнічні властивості олій біологічного походження. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь: ТДАТУ, 2011. Вип. 11. Т. 4. С. 160-167.
100. Журавель Д.П. Дослідження триботехнічних властивостей ПММ та обґрунтування вибору методу контролю зносу пар тертя в середовищі біопалива. Міжвузівський семінар «Тракторна енергетика». Харків, ХНТУСГ. 2011. С. 52-53.

101. Посвятенко Е. К., Журавель Д.П. Прогнозування ресурсу деталей функціональних систем мобільних машин до виводу їх в ремонт. Вісник Національного транспортного університету: наук.-техн. збірник / Нац. трансп. ун-т. К., 2011. № 24, ч. 2. С. 45-48.

102. Журавель Д. П., Юдовинський В.Б., Коломоєць В.А. Исследования видов изнашивания деталей топливной аппаратуры в среде биоуглеводородных жидкостей. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь, 2012. Вип. 12, т. 1. С. 62-67.

103. Журавель Д. П. Оцінка зносу трибоспряжень в середовищі біопаливо-мастильних матеріалів. Праці ТДАТУ: наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь, 2012. Вип. 12. Т.2. С. 28-33.

104. Журавель Д. П. Обґрунтування методу прогнозування ресурсу мобільної техніки при експлуатації її на біопаливі. Праці ТДАТУ: наукове фахове видання / ТДАТУ. Вип. 12. т. 3. Мелітополь, 2012. С. 109-119.

105. Журавель Д. П. Прогнозирование ресурса плунжерных пар топливных насосов. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць / КНТУ. Кіровоград, 2012. Вип. 25. Т.1. С. 46-49.

106. Журавель Д. П. Водневе зношування матеріалів трибоспряжень дизельних двигунів в середовищі біодизеля. Міжвузівський семінар «Тракторна енергетика». Харків, ХНТУСГ, 2012. С. 52-56.

107. Журавель Д.П., Васько В.О. Методика оцінки змащувальних властивостей біологічних палив. Матеріали науково-технічної конференції Вип.10. Т.4. Мелітополь 2012. С. 31-33.

108. Журавель Д. П., Юдовинський В.Б., Коломоєць В.А. Экспериментальное моделирование процесса работы плунжерных пар ДВС. Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві: зб. наук. праць / Ін-т механізації тваринництва УААН; гол. ред. І. А. Шевченко. Запоріжжя, 2012. Вип. 1(9). С. 195-199.

109. Журавель Д. П. Визначення металевого контакту при абразивному зношуванні деталей спряжень транспортних засобів [Електронний ресурс]. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету / ТДАТУ. Мелітополь, 2012. Вип. 2. Т. 1. С. 254-259.

110. Дидур В.А., Журавель Д. П., Юдовинський В.Б., Коломоєць В.А. Исследование износа материалов деталей плунжерных пар топливной аппаратуры ДВС в среде биотоплива. Науковий вісник Луганського національного аграрного університету / ЛНАУ. Луганськ, 2012. № 41. С.67-76.

111. Журавель Д. П. Взаємозв'язок між коефіцієнтом зносу та коефіцієнтом тертя матеріалів. Вісник СевНТУ: зб. наук. праць / СевНТУ. Севастополь, 2012. – Вип. 128: Машиноприладобудування та транспорт. С. 72-76.

112. Журавель Д. П., Юдовинський В.Б., Мітков Б.В. Дослідження впливу присадок на експлуатаційні властивості олій [Електронний ресурс]. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: Електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь, 2012. Вип. 2, т. 4.

113. Журавель Д. П., Юдовинський В.Б., Коломоєць В.А. Исследования местных износов деталей плунжерных пар топливных насосов ДВС. Праці ТДАТУ. Вип. 2.Т.5. Мелітополь, 2012. С. 93-98.

114. Журавель Д.П. Моделирование износа зубчатых передач трансмиссий в среде биологических масел. Материалы международной научно-производственной конференции «Современные проблемы инновационного развития агроинженерии». Белгород: ФГБОУ ВПО «Белгородская государственная академия им. В.Я. Горина», 2012. Часть 2. С. 37-40.

115. Посвятенко Е.К., Журавель Д.П. Визначення основних видів взаємодій в системах контакту мобільної техніки. Управління проектами, системний аналіз і логістика: Науковий журнал. Вип.10. К.: НТУ, 2012. С. 205-209.

116. Журавель Д. П., Кушлик Р.В. Ультразвуковой экспресс-метод оценки глицерина в биодизеле. Известия МААО. СПб., 2013. Вып. 16. т. 1. С. 104-109.

117. Журавель Д. П., Юдовинський В.Б., Кюрчев С.В. Прогнозирование ресурса трибосопряжений мобильной техники при использовании различных смазочных материалов. Материалы IX Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК». Ставрополь: ФГБОУ ВПО Ставропольский государственный аграрный университет, 2013. С.50-54.

118. Дидур В.А., Журавель Д.П., Юдовинський В.Б., Коломоєць В.А. Влияние износа

плунжерних пар топливних насосов високого тиску на их гидравлическую плотность. Известия МААО. СПб, 2013. Вып. 18. С. 39-43.

119. Журавель Д. П. Моделювання енергетичного балансу трибосистеми сільськогосподарської техніки в середовищі змащувальних матеріалів. Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти: збірник наукових праць / УВ МААО; голов. ред. В. А. Дідур. Запоріжжя, 2013. Вип. 1. С. 126-132.

120. Журавель Д.П., Посвятенко Е.К. До прогнозування ресурсу мобільної техніки. Матеріали LХІХ наукової конференції професорсько-викладацького складу національного транспортного університету. К: НТУ, 2013. С.5-8.

121. Журавель Д. П., Коломоець В.А. Дослідження надійності ущільнюючих елементів паливних насосів високого тиску дизелів в середовищі біопалива. Праці ТДАТУ: наукове фахове видання. Мелітополь, 2014. Вип. 14. Т.2. С. 76-86.

122. Дидур В.А., Журавель Д.П., Юдовинський В.Б, Коломоець В.А. Сравнительная оценка надёжности плунжерных пар топливной аппаратуры дизелей на различных видах топлив. Материалы международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве». Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2014. С. 250-257.

123. Журавель Д. П. Особливості використання олив біологічного походження для мобільної техніки. Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти: зб. наук. праць / УВ МААО; гол. ред. В. А. Дідур. Запоріжжя, 2014. Вип. 2. С. 157-165.

124. Журавель Д. П. Обробка біодизеля ультразвуком. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь, 2015. Вип. 15, т. 2: Технічні науки. С. 181-184.

125. Журавель Д.П., Юдовинський В.Б, Коломоець В.А. Влияние абразивности биотоплива на износ плунжерных пар ТНВД. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь, 2015. Вип. 15, т. 3. С. 350-356.

126. Дидур В. А., Журавель Д.П. Методика изучения дисциплины «Гидравлика» в аграрных высших технических заведениях. Сборник трудов по материалам III международ-

ной научно-практической интернет-конференции «Инновационные технологии в современном образовании». Королев, 2015. С. 187-191.

127. Дидур В. А., Журавель Д.П. Надежность мобильной сельскохозяйственной техники при использовании биологических топливо - смазочных материалов. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України / НУБіП; відп. ред. Д. О. Мельничук. К., 2016. № 251. С. 67-75.

128. Журавель Д.П. Методология обеспечения надежности мобильной техники при использовании биологических ТСМ. Енергозабезпечення технологічних процесів в агропромисловому комплексі України: матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції. Мелітополь, 2015. С. 8-10.

129. Журавель Д. П. Методология оцінки надійності мобільної сільсько-господарської техніки при експлуатації на різних видах паливо-мастильних матеріалів. Вісник Сумського національного аграрного університету / СНАУ. Суми, 2016. Вип. 10/3(31). С.66-71. (Механізація та автоматизація виробничих процесів).

130. Журавель Д. П. Вплив забрудненості абразивом біопаливо-мастильних матеріалів на енергоємність поверхневих шарів металів вузлів і агрегатів мобільної техніки. Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти. Херсон, 2017. Вип. 5. С.56-65.

131. Журавель Д. П. Забезпечення надійності мобільної сільськогосподарської техніки при експлуатації на різних видах паливо-мастильних матеріалів. Сучасні проблеми землеробської механіки: збірник тез доповідей XVII міжнародної наукової конференції (м. Суми, 17-18 жовтня 2016 р.) / СНАУ. Суми, 2016. С. 163-164.

132. Журавель Д. П. Підвищення ефективності експлуатації мобільної сільськогосподарської техніки при використанні біопаливо-мастильних матеріалів. Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2017: збірник тез доповідей XIII Міжнародної наукової конференції (м. Київ, 17-19 травня 2017 р) / НУБіП. – К., 2017. – С. 155-156.

133. Журавель Д. П. Підвищення довговічності функціональних систем сільськогосподарської техніки при використанні біопаливно-мастильних матеріалів. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. К., 2018. Вип. 282. С.279-292.

134. Журавель Д.П., Постол Ю.О., Гулевський В.Б., Бондар А.М. Обґрунтування доцільності використання змащувальних матеріалів на основі біоолив для мобільної енергетики. Perspectives of science and education. Proceedings of the 6th International youth conference. SLOVO\WORD, New York, USA. 2018. Pp. 146-155.

135. Журавель Д.П., Постол Ю.О., Гулевський В.Б., Бондар А.М. Оцінка ефективності і технічного рівня ґрунтообробних мотоблоків. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи розвитку технічних наук у країнах ЄС та в Україні». Влоцлавек, Республіка Польща, 2018.- С.99-103.

136. Журавель Д. П. Моделювання процесу зношування прецизійних пар паливних систем мобільної техніки при експлуатації на біодизелі. Праці ТДАТУ. Вип. 18.Т.2. Мелітополь, 2018. С. 105-118.

137. Журавель Д. П. Підвищення ефективності використання мобільної сільськогосподарської техніки шляхом забезпечення оптимального складу сумішевих біодизельних паливних. Науковий вісник ТДАТУ: Електронне наукове фахове видання. Вип.8. Т.2. Мелітополь: ТДАТУ, 2018. С. 91-107.

138. Журавель Д.П., Петренко К.Г. Роль дисципліни «Триботехніка» в підготовці магістрів спеціальності «Галузеве машинобудування». Збірник науково-методичних праць “Удосконалення освітньо-виховного процесу в закладі вищої освіти”. Мелітополь, 2019. С.163-168.

139. Журавель Д.П., Постол Ю.О., Гулевський В.Б., Бондар А.М. Обоснование критериев оценки эффективности смазочного действия моторных масел. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Technical sciences: history, the present time, the future, EU experience” // Wloclawek, Republic of Poland, September 27-28, 2019. Izdevnieciba “ Baltija Publishing”, 2019. S.155-162.

140. Журавель Д.П., Постол Ю.О., Гулевський В.Б., Бондар А.М. Електрохімічні технології очищення стічних вод. «Сучасний рух науки»: матеріали ІХ міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 2-3 грудня 2019 р. Дніпро, 2019. Т.1. С. 424-430.

141. Журавель Д. П. Обґрунтування пристрою для оцінки триботехнічних властивостей змащувальних матеріалів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Вип. 9. Том 1. Мелітополь, 2019. С.12-22.

142. Журавель Д. П. Моделивання працездатності машинотракторного агрегату при експлуатації на біодизелі. Праці ТДАТУ. Вип.19. Т.3. Мелітополь, 2019. С.57-68.
143. Журавель Д. П. Обґрунтування методики прогнозування технічного стану функціональних систем мобільних енергетичних засобів. Праці ТДАТУ. Вип. 19.Т.4. Мелітополь, 2019. С.86-104.
144. Журавель Д. П., Бондар А. М., Мілько Д. О. Використання біологічної оливи для сільськогосподарської техніки. Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодержавний збірник / ННЦ «ІМЕСГ». Глеваха, 2019. Вип. № 10 (109). С. 125-131.
145. Galina Gritsaenko, Igor Gritsaenko, Andrei Bondar, Dmytro Zhuravel. Mechanism for the Maintenance of Investment in Agriculture. Modern Development Paths of Agricultural Production. Springer Nature Switzerland AG., 2019. – P.29-40.
146. Журавель Д.П. Оцінка надійності паливного насоса високого тиску дизельного двигуна при експлуатації на різних видах паливних. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного. Вип. 10. Том 2. - Мелітополь, 2020. 11 с.
147. Natalia Sorokova, Vladimir Didur, Miroslav Variny. Mathematical Modeling of Heat and Mass Transfer during Moisture–Heat Treatment of Castor Beans to Improve the Quality of Vegetable Oil. Agriculture. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. 2022. Т. 12 (9). 1356 S.
148. Журавель Д.П. Методологічні принципи підвищення надійності сільськогосподарської техніки при використанні біопально-мастильних матеріалів. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали I Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції (Мелітополь, 01-24 квітня 2020 р.) / ТДАТУ: ред. кол. В. М. Кюрчев, В. Т. Надикто, О. Г. Скляр [та ін.]. - Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С.349-354.
149. Журавель Д.П. Количественные и качественные изменения показателей моторных масел в процессе их использования. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали I Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції (Мелітополь, 01-24 квітня 2020 р.) / ТДАТУ: ред. кол. В. М. Кюрчев, В. Т. Надикто, О. Г. Скляр [та ін.]. - Мелітополь: ТДАТУ, 2020. - С.322-327.
150. Журавель Д.П. Влияние процессов старения и загрязнения моторных масел на

изнашивание основных узлов тракторных двигателей. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали I Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції (Мелітополь, 01-24 квітня 2020 р.) / ТДАТУ: ред. кол. В. М. Кюрчев, В. Т. Надикто, О. Г. Скляр [та ін.]. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С.333-338.

151. Журавель Д. П. Вплив технічного обслуговування і ремонту на надійність машин та обладнання при використанні біологічних рідин. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного [Електронний ресурс]. Вип. 10. Том 1. Мелітополь, 2020. 9 с. DOI:10.31388/2220-8674-2020-1-3.

152. Журавель Д. П. Раціональне використання біологічних олив для мобільних енергетичних засобів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного [Електронний ресурс]. Вип. 10. Том 1. Мелітополь, 2020. 17 с. DOI:10.31388/2220-8674-2020-1-9.

153. Kyrylo Samoichuk, Dmytro Zhuravel, Olga Viunyk, Dmytro Milko, Andrii Bondar. Research on milk homogenization in the stream homogenizer with separate cream feeding. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2020. Vol. 14. P.142-148.

154. Dmitry Milko, Dmytro Zhuravel, Kyrylo Samoichuk, Yulia Postol. Revealing new patterns in resourcesaving processing of chromium-containing ore raw materials by solidphase reduction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 1/12(103). P.24-29.

155. Dmytro Milko., Oleksandr Sclyar., Radmila Sclyar., Ganna Pedchenko., Dmytro Zhuravel. Results of the nutritional preservation research of the alfalfa laying on storage with two-phase compaction. *INMATEH - Agricultural Engineering. National Institute Of Research-Development For Machines And Installations Designed To Agriculture And Food Industry INMA Bucharest*, Vol. 60, no.1 / 2020. P. 269-274.

156. Kyrylo Samoichuk, Dmytro Zhuravel, Nadiya Palyanichka, Vadim Oleksienko, Serhii Petrychenko. Improving the quality of milk dispersion in a counter-jet homogenizer. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2020. Vol. 14. P.633-640.

157. Журавель Д.П. Аналіз технологій отримання біодизельних паливних. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь, 02-27 листопада 2020 р. С.65-71.

158. Журавель Д.П. Підвищення зносостійкості трибосистем при використанні добавок. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь, 02-27 листопада 2020 р. С.422-431.

159. Журавель Д.П. Бондар А.М. Обґрунтування показників експлуатаційної надійності енергетичних засобів. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь, 02-27 листопада 2020 р. С.467-473.

160. Журавель Д.П. Бондар А.М. Несправності рульового керування та їх наслідки. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь, 02-27 листопада 2020 р. С.478-479.

161. Журавель Д.П., Петренко К.Г. Обґрунтування процесів при терті та зношуванні трибоспряжень. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь, 02-27 листопада 2020 р. С.495-501.

162. Журавель Д.П. Безмоторні методи оцінки якості моторних оливи енергетичних засобів. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь, 02-27 листопада 2020 р. С.504-510.

163. Журавель Д.П. Обґрунтування видів зношування енергетичних засобів та методів їх оцінки. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агро-промисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь, 02-27 листопада 2020 р. С.537-538.

164. Журавель Д.П., Бондар А.М. Технологія ремонту рульових рейок. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь, 02-27 листопада 2020 р. С.537-538.

165. Журавель Д.П. Методика розрахунку енергоємності матеріалів деталей три-

боспряжень. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь, 02-27 листопада 2020 р. С.605-610.

166. Журавель Д.П. Діагностуванні технічного стану енергетичних засобів шляхом контролю якісних показників змащувальних оливо. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь, 02-27 листопада 2020 р. С.402-412.

167. Журавель Д.П. Розподіл енергії в процесі тертя і зношування по-верхонь деталей вузлів і агрегатів. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Ін-тернет-конференції. Мелітополь, 02-27 листопада 2020 р. С.637-644.

168. Журавель Д.П., Бурцева С.О. Дослідження гідроабразивного зносу заглибних насосів. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь, 02-27 листопада 2020 р.

169. Журавель Д.П., Клик А.В. Обґрунтування кавітаційного зносу енергосистем. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь, 02-27 листопада 2020 р. С.488-492.

170. Журавель Д.П., Лакосіна А.О. Фретинг і фретинг-втома констру-кційних матеріалів і деталей. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь, 02-27 листопада 2020 р. С.525-528.

171. Struchaiev N., Postol Y., Stopin Y., Zhuravel D., Hulevskyi V. Ways to improve the efficiency of pipelines heat insulation. Problems of the Regional Energetics, 2 (46) 2020. P. 43-52.

172. Журавель Д. П., Бондар А. М. Покращення та оцінка якісних показників відпрацьованих автотракторних оливо для сільськогосподарської техніки. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 1. 15 с. DOI: 10.31388/2220-

8674-2021-1-6.

173. Журавель Д. П., Бондар А. М. Прогнозування ресурсу трибосистем при використанні сумішевих олив. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 1. 19 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-1-10.

174. Журавель Д. П., Бондар А.М., Дашивець Г.І., Паніна В.В. Обґрунтування швидкісних параметрів роботи машино-тракторного агрегату. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 2. С. 85-97. 13 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-16.

175. Dmytro Zhuravel. Research of lubricant properties of used tractor motor oils. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 2. 18 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-5.

176. Kuznetsov, M., Lysenko, O., Chebanov, A., Zhuravel, D. (2021). Ensuring power balance in a hybrid power system with a backup generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (8 (114)), 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245557>.

177. Журавель Д.П., Бондар А.М. Підвищення надійності паливної системи сільськогосподарської техніки за рахунок удосконалення системи очищення дизельного біопального. Обуховські читання: ХУІ Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 30 березня 2021 року: тези конференції. Національний університет біоресурсів і природокористування України. К., 2021. С.81-84.

178. Журавель Д.П. Підвищення надійності дизельних двигунів за рахунок підвищення повноти згорання біодизеля. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Молодь і технічний прогрес в АПВ» Інноваційні розробки в аграрній сфері. Том 2. Харків: ХНТУСГ, 2021. С. 22-24.

179. Zhuravel D., Boltianska N. Integrated approach to ensuring the reliability of complex systems. The XII International Science Conference «Current issues, achievements and prospects of Science and education», May 03 – 05, 2021, Athens, Greece. P. 231-233.

180. Біляєва А.С., Журавель Д.П., Болтянський Б.В. Епіламування - ефективний захист трубопроводів від корозії. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали III Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференц. Мелітополь, 2021. С. 47-49.

181. Іванова Д.В., Журавель Д.П. Електроерозійна обробка металів. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали III Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференц. Мелітополь, 2021. С. 497-499.

182. Облещенко А.Д., Журавель Д.П. Методи підвищення довговічності деталей та вузлів аксіально-поршневих гідромашин. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали III Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференц. Мелітополь, 2021. С. 502-504.

183. Фурдак Т.В., Журавель Д.П. Вплив на випробувальну поверхню робочих олив, які використовуються в гідросистемах сільськогосподарських машин. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали III Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференц. Мелітополь, 2021. С. 470-472.

184. Алдошин А.С. Журавель Д.П. Ремонт блоків циліндрів з тріщинами верхніх перемичок. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали III Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференц. Мелітополь, 2021. С. 480-482.

185. Алдошин А.С. Журавель Д.П. Дослідження руйнувань в корінних опорах двигунів. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали III Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференц. Мелітополь, 2021. С. 491-493.

186. Алдошин А.С. Журавель Д.П. Ремонт чавунних блоків з тріщинами водяних сорочок. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали III Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференц. Мелітополь, 2021. С. 514-516.

187. Журавель Д. П., Бондар А. М., Дашивець Г. І. Методика обробки емпіричних даних якісних показників роботи колісної машини. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Мелітополь: ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 2. 13 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-2-2

188. Zhuravel, D.; Samoichuk, K.; Petrychenko, S.; Bondar, A.; Hutsol, T.; Kubo' n, M.; Niemiec, M.; Mykhailova, L.; Gródek-Szostak, Z.; Sorokin, D. Modeling of Diesel Engine Fuel Systems Reliability When Operating on Biofuels. *Energies*, 2022, 15, 1795. <https://doi.org/10.3390/en15051795>.

189. Kaplan, M.; Klimek, K.; Maj, G.; Zhuravel, D.; Bondar, A.; Lemeshchenko-Lagoda, V.; Boltianskyi, B.; Boltianska, L.; Syrotyuk, H.; Syrotyuk, S.; et al. Method of Evaluation of Materials Wear of Cylinder-Piston Group of Diesel Engines in the Biodiesel Fuel Environment. *Energies*, 2022, 15, 3416. <https://doi.org/10.3390/en15093416>.

190. Журавель Д. П., Бондар А. М., Філенко Д. Ю. Структурний аналіз надійності сільськогосподарської техніки при експлуатації на біопально-мастильних матеріалах. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Мелітополь: ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 3. 12 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-3-5.

191. Журавель Д. П. Прогнозування надійності паливної системи мобільної техніки при використанні біодизельних паливних. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Мелітополь: ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 3. 15 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-3-14.

192. Borysov, V., Torubara, O., Volokh, V., Poliakov, A., Yamshinskij, M., Lukianenko, I., Andreev, A., Bilko, T., Zhuravel, D., Ivanchenko, D. (2022). Identifying features in the structural and phase composition of the products of recycling of the scale of high-speed cutting steel by carbon thermal reduction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (12 (120)), 46–51. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.269507>.

193. Zhuravel, D. Methodology for forecasting the resource of diesel units and units in a biofuel environment. "Information technologies in energy and agro-industrial complex" Conference materials xith international scientific conference, October 4-6, LVIV 2022, P. 44-47.

194. Журавель Д.П. Обґрунтування перспективних напрямків оцінки ремонтпридатності блоків циліндрів двигунів мобільної техніки. MATERIALS of the III International Scientific and Practical Internet Conference "The development of modern science and education: realities, problems of quality, innovations" September 30, Запоріжжя 2022, С. 108-113.

195. Журавель Д.П. Обґрунтування надійності паливних систем дизелів при використанні біопальних. Збірник тез доповідей XXIII Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (16–18 жовтня 2022 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Житомирський агротехнічний фаховий коледж. Київ. Житомир. 2022. С. 238-241.

196. Журавель Д.П. Характеристика відмов агрегатів і систем сільськогосподарської техніки при експлуатації на біопально-мастильних матеріалах. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі», Запоріжжя, 2022. С. 84-86.

197. Журавель Д. П., Бондар А. М. Обґрунтування впливу системи очищення відпрацьованих робочих рідин на надійність гідравлічних систем. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Мелітополь: ТДАТУ, 2023. Вип. 13, том 1. 14 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1 -4.

198. Сорокова Н.М., Дідур В.В. Математичне моделювання динаміки тепломасопереносу в багаточанній жаровні. Проблеми промислової теплотехніки, 2019. №4. С 56-65.

199. Fischer E. G., *Plast. Inst. Trans.* 1956. V.24, №1. P 125 – 135.

200. Rowell H.S., Finalson D., “*Engineering*”. 1922. V.114, № 6. P. 606 – 611.

201. Rogowsky Z. M., “*Engineering*”. 1946. V.162. №7. P. 358 – 361.

202. Eirich F. R., *Inst. Mech. Eng. (London)*. 1947.Proc. 156. P. 62 – 67.

203. Piggot W.T., *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.*, 1951. V. 73. № 10. P. 947 – 952.

204. Carley J. F., Mallou R.S., McKelvey J.M., *Ing. Chem.*, 1953. V. 45. № 5 P. 974 – 977.

205. Carley J.F., Strub R.A., *Ind. Eng. Chem.*, 1953.V. 45, № 5. P. 970 – 974.

206. Carley J.F., *SPE Journal*.1953. V. 9, № 3. P. 9 – 13.

207. Carley J. F., Strub R.A., *Ind. Eng. Chem.* 1953. V. 45, № 5. P. 978 – 982.

208. Eccher S., Valentinotti A., *Ind. Eng. Chem.* 1958.V. 50, № 9. P. 829 – 836.

209. Carley J.F., Strub R.A., *Ind. Eng. Chem.* 1953. V. 45, № 5.P. 970 – 974.

210. Carley J.F., *SPE Journal*. 1953. V. 9, № 3. P. 9 – 13.

211. Carley J. F., Strub R.A., *Ind. Eng. Chem.* 1953. V. 45, № 5. P. 978 – 982.

212. Eccher S., Valentinotti A., *Ind. Eng. Chem.* 1958. V. 50, № 9. P. 829 – 836.

213. Maddock В.Н., Kunststoffe-Plast. 1957. Bd. 4, № 3. S. 281 – 292.
214. Maddock В.Н., SPE Journal. 1959. V. 15, № 5. P. 383 – 389.
215. Maddock В.Н., SPE Journal. 1961. V. 17, № 4. P. 368 – 373.
216. Ткаченко А.В., Дидур В.А. 2014. Оборудование и технология сушки семян подсолнечника высших репродукций / Lambert Academie Publishing, 165 (Германия).
217. Дидур В.А, Ткаченко В.А. 2014. Технология переработки семян клещевины на малотоннажных предприятиях. Вестник Украинского отделения международной академии аграрного просвещения. Мелитополь: Копицентр «Документ сервис», с.21 – 36.
218. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н. Математическое моделирование процесса регенерации твердых сорбентов. Наукові праці ОНАХА (Одеської національної академії харчових технологій). 2007. Вип. 30. Т. 1. С. 12–17.
219. Nikitenko N.I., Snezhkin Yu.F., Sorokovaya N.N. Development of a theory and methods for calculating the heat and mass transfer in drying a porous body with multicomponent vapor and liquid phases. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2008. Т. 81, № 6. С. 1153–1167.
220. Нікітенко М.І., Снежкін Ю.Ф., Сорокова Н.М. Математичне моделювання динаміки зневоднення в конвективних сушильних установках безперервної дії. Вісник нац. університету «Львівська політехніка». 2013. №761. С. 265–269.
221. Сороковая Н.Н., Коринчук Д.Н. Математическая модель и метод расчета динамики сушки и термодеструкции биомассы. Наукові праці (Одеська національна академія харчових технологій). 2018. Вип. 1, Т.82. С. 66 – 72.
222. Сорокова Н.М., Дідур В.В. Математичне моделювання динаміки тепломасопереносу в багаточанній жаровні. Проблеми промислової теплотехніки, 2019. №4. С 56-65.
223. Назаренко І. П. Електротехнологічний комплекс очищення та сепарації слабопровідних суспензій в електричному полі: дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.09.03. Київ, 2015. 382 с.

Наукове видання

Журавель Дмитро Павлович

доктор технічних наук, професор

Дідур Володимир Володимирович

доктор технічних наук, професор

**МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ГЛИБОКОЇ
ПЕРЕРОБКИ НАСІННЯ РИЦИНИ НА
ЕНЕРГЕТИЧНУ БІОСИРОВИНУ**

Монографія