

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

ДІДУР ВОЛОДИМИР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 631.56:665.335.5

**МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ГЛИБОКОЇ ПЕРЕРОБКИ
НАСІННЯ РИЦИНИ В УМОВАХ МАЛОТОННАЖНОГО ПІДПРИЄМСТВА**

Спеціальність 05.05.11 – машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Мелітополь – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Таврійському державному агротехнологічному університеті імені Дмитра Моторного Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: член-кореспондент НААН України,
доктор технічних наук, професор
Кюрчев Володимир Миколайович,
Таврійський державний агротехнологічний
університет імені Дмитра Моторного, ректор

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дідух Володимир Федорович,
Луцький національний технічний університет,
завідувач кафедри аграрної інженерії

доктор технічних наук, професор
Мироненко Валентин Григорович,
Національний науковий центр «Інститут ме-
ханізації та електрифікації сільського госпо-
дарства» НААН України, головний науковий
співробітник відділу електрифікації та автома-
тизації агротехнологічного виробництва

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Братішко Вячеслав Вячеславович,
Національний університет біоресурсів та
природокористування України,
декан механіко-технологічного факультету

Захист відбудеться «06» травня 2021 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 18.819.01 в Таврійському державному агротехнологічному університеті імені Дмитра Моторного Міністерства освіти і науки України за адресою: 72312, Запорізька область, м. Мелітополь, пр. Б.Хмельницького, 18, ауд. 1.111.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного за адресою: 72312, Запорізька область, м. Мелітополь, пр. Б.Хмельницького, 18

Автореферат та дисертація розміщені за адресою в мережі Internet <http://www.tsatu.edu.ua/nauka/n/specializovani-vcheni-radu/specializovana-vchena-rada-d-18-819-01/>

Автореферат розісланий «05» квітня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

Ю.О. Вовк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Рицина – одна з олійних культур, для якої є дуже сприятливою ґрунто-кліматична зона Півдня України. Основним продуктом переробки насіння рицини є рицинова олія, яка складає 50-55% загального об'єму насіння, що є найвищим значенням серед олійних культур.

Рицинова олія завдяки власним фізико-хімічним властивостям є важливою сировиною для багатьох галузей економіки. В ній міститься 81-96% гліцеридів риценолевої кислоти, а діелектрична постійна складає 4,0-4,5%, в той час як для інших олійних культур вона не перевищує 3,0-3,2%. Продукти переробки цієї культури в Україні є без винятку предметом імпорту.

У зв'язку з цим виникла **народно-господарська проблема** державного рівня, яка полягає у розробці імпортозамінних технологій глибокої переробки насіння рицини.

Для організації переробки рицини в Україні було вивчено досвід провідних світових виробників – італійської фірми «Alimenta», німецького концерну «Кгир» та інших. Встановлено, що сучасні господарсько-економічні умови не забезпечують ефективне функціонування підприємств великої потужності. Найбільш доцільним є будівництво сітки малотоннажних підприємств по переробці насіння рицини потужністю 15, 30 і 45т за добу.

Для створення таких потужностей необхідно розробити нові технологічні підходи та техніко-технологічні рішення, зокрема, для основних технологічних операцій переробки рицини: волого-теплової підготовки м'ятки, віджиму олії в гвинтових пресах і очищення віджатої олії. Вирішення вказаної проблеми полягає в удосконаленні названих технологій і їх адаптації до умов малотоннажного виробництва. Це викликає необхідність вирішення **науково-технічної проблеми**, суть якої полягає у розробці моделей і методів наукового обґрунтування технологічних режимів і конструктивних параметрів технологічного обладнання переробки рицини в умовах малотоннажного підприємства.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Робота виконана у відповідності з концепцією Державної цільової науково-технічної програми розвитку виробництва та використання біологічних видів палива, яка ухвалена Розпорядженням Кабінету Міністрів України №276-р від 12 лютого 2009р. згідно Закону України «Про альтернативні види палива», №1391-XIV від 14.01.2000р. та «Енергетичною стратегією України на період до 2030 року», яка схвалена Розпорядженням Кабінету Міністрів України №1071 від 24.07.2013р., Наказом Мінфіна України №631 від 04.07.2006р. «Про визначення пріоритетних напрямів енергозбереження», Постановою Кабінету Міністрів України №1774 від 22.12.2006р. «Програма розвитку біопалива».

Дослідження виконані за комплексною програмою наукових досліджень НДІ механізації землеробства півдня України Таврійського державного агротехнологічного університету, НТП «Розробка наукових основ, систем, технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки південного регіону України на період 2007...2010рр.» підпрограма «Виробництво біосировини та раціональне використання паливо-мастильних матеріалів (№ держреєстрації

0107U008952), НТП «Розробка технології, створення та використання експериментальних зразків для переробки рицини на енергетичну біосировину та раціональне використання продуктів її конверсії (№ держреєстрації 0111U001950), НТП «Удосконалення організації, технології та засобів технічного сервісу складальних сільськогосподарських, енергетичних засобів в Запорізькій області на період 2010...2015рр.» (№ держреєстрації 0111U002560), НТП «Підвищення надійності технічних та зрошувальних систем та комплексів АПК, розділ «Розробка технологій та апаратів для очищення та контролю від забруднення робочих та мастильних рідин на період 2016-2020рр. (№ держреєстрації 0116U002743).

Концептуальна ідея роботи полягає в тому, що підвищення ефективності переробки насіння рицини можливе за рахунок розробки нової безекстракційної технології отримання олії, оптимізації технологічних режимів і обґрунтування конструкційних параметрів обладнання, пристосованого для умов малотоннажного підприємства.

Мета і задачі досліджень. *Мета досліджень* – забезпечення глибокої переробки насіння рицини в умовах малотоннажного підприємства з технологічним виходом рицинової олії заданої якості, що забезпечує залишкову олійність жмиху не більше 8%, шляхом застосування двократного пресування з попередньою волого-тепловою підготовкою сировини.

Відповідно до поставленої мети були сформульовані такі *завдання досліджень*:

1. Провести аналіз світового досвіду переробки насіння рицини, існуючих технологій і технічних засобів отримання продуктів переробки насіння рицини, теоретичних основ волого-теплової підготовки насіння олійних культур до віджиму, пресування мезги в гвинтовому пресі і очищення вилученої олії від механічних домішок та фосфатидів.

2. Здійснити моделювання та обґрунтування процесів волого-теплової обробки м'ятки рицини перед її пресуванням та очищення пресової рицинової олії від механічних домішок та фосфатидів під дією електричного поля.

3. Дослідити фізико-механічні, термодинамічні та технологічні властивості насіння рицини та визначити вихідні вимоги щодо розроблення нової безекстракційної технології його глибокої переробки.

4. Обґрунтувати конструкційно-технологічні параметри та режими роботи обладнання для отриманої рослинної олії заданої якості.

5. Удосконалити безекстракційну технологію переробки рицини методом двократного пресування для умов малотоннажного підприємства.

6. Провести фінансово-економічний аналіз безекстракційної технології переробки рицини методом двократного пресування, адаптованої для умов малотоннажного виробництва потужністю 15 т/добу по вихідній сировині.

Об'єктом дослідження є технологічний процес глибокої переробки насіння рицини, адаптований до умов малотонажного підприємства.

Предметом дослідження є закономірності впливу властивостей насіння рицини та конструкційно-технологічних параметрів обладнання на ефективність виробництва рицинової олії та її якісні показники.

Методи досліджень. При розв'язанні задач, поставлених у роботі, застосовувалися методи термодинаміки, гідродинаміки, тензорного обчислення та математичної фізики.

Вивчення процесу волого-теплової підготовки м'ятки базувалося на молекулярній теорії тепло-масопереносу, що обґрунтована на основі закону інтенсивності електричного випромінювання мікрочастинок М.І. Нікітенко і на відміну від феноменологічної теорії дозволяє визначити динамічні і кінетичні характеристики речовини. Приймали, що процеси дифузії та випаровування рідини є активаційними і їх інтенсивність істотно залежить від температури. Шар м'ятки розглядався як багатокомпонентна колоїдна капілярно-пориста дисперсна система, що включає в себе «скелет», рідку фазу у вигляді води і олії та порогазову суміш.

Для моделювання складних рухів м'ятки в чанах жаровні застасовані методи, що використовуються при дослідженні руху турбінних мішалок. Завдяки використанню цього методу, наряду з основним рухом визначено потік вторинної циркуляції.

Процес віджиму олії із мезги розглядали як двофазну систему з аналогічними, одночасно протікаючими процесами взаємного переміщення обох фаз і фільтрації олії через шар «скелета» мезги. Було застосовано метод дослідження процесу гвинтового плинину розплаву полімерів в зоні дозування черв'яка екструдера, при моделюванні руху мезги насіння рицини в робочій зоні гвинтового пресу, завдяки спільним особливостям: обидва матеріали, що переробляються, рухаються по гвинтовій поверхні під тиском, при високій температурі та великій в'язкості і розглядаються як ньютонівські рідини. На процес руху обох матеріалів впливає як циркуляційна так і поступальна течія, а також тепло, що виділяється завдяки в'язкому тертю і теплообміну з навколишнім середовищем.

Для моделювання руху мезги в робочому каналі гвинтового преса застосований метод зворотнього руху, який дозволив представити гвинтоподібний робочий орган у вигляді розгорнутого каналу, який був реалізований на спеціально розробленому експериментальному комплексі, що був використаний як модель технологічної лінії.

Для експериментального моделювання процесу електрофлотації було зроблено лабораторну установку, яка дозволила очищати віджату рицинову олію за методом, захищеним патентом України на корисну модель № 118672.

Наукова новизна результатів полягає в розв'язанні науково-прикладної проблеми, що полягає у науковому обґрунтуванні технологічних режимів і конструкційних параметрів технологічного обладнання для переробки рицини в умовах малотоннажного підприємства.

Вперше:

- на основі розробленої математичної моделі отримано аналітичні закономірності кінетики та динаміки тепло-масопереносу і фазових перетворень при жарінні м'ятки рицини, використання яких оптимізувати технологічні режими та конструкційні параметри багаточанної жаровні з урахуванням гідродинаміки пористої системи мезги;

- експериментальним шляхом отримано функціональні залежності виходу олії рицини від реологічних параметрів мезги її насіння, розроблено методичні

засади та обґрунтовано конструкційно-технологічні параметри гвинтового преса для малотоннажного виробництва.

- розроблено новий спосіб очищення віджатої олії від фосфатидів та механічних домішок методом електрофлотації, який відрізняється від відомих способів більш низькими енерговитратами.

Набуло подальшого розвитку:

- методологія експериментальних досліджень основних фізико-механічних, тепло-фізичних та технологічних властивостей насіння рицини та її елементів, що дало можливість їх використання при розв'язанні диференціальних рівнянь, що описують закономірності процесів тепло-масопереносу в дисперсних пористих системах при підготовці мезги до віджиму олії;

- числовий метод сумісного розв'язання систем нелінійних диференціальних рівнянь дифузійно-фільтраційного тепло-масопереносу (математична модель процесу тепло-масопереносу і фазових перетворень в жаровні), який базується на тришаровій перерахунковій різницевої схемі.

Удосконалено:

- методику використання розгорнутого каналу шнека для експериментального дослідження руху мезги з урахуванням сил тертя, опору силам стиснення левої частини мезги, нейтрального тиску і протитиску на виході з пресу, що дозволило вперше дослідити вплив технологічних і конструкційних параметрів гвинтового преса на його продуктивність і в цілому визначити їх оптимальні значення;

- технологію глибокої безекстракційної переробки насіння рицини, адаптованої до малотоннажного виробництва, яка відрізняється від відомих тим, що у технологічній схемі використовується обладнання із оптимізованими конструкційно-технологічними параметрами.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- визначені фізико-механічні, тепло-фізичні і технологічні властивості насіння рицини, що дозволило установити основні закономірності взаємодії робочих органів обладнання технологічної лінії для переробки рицини із технологічним середовищем у вигляді м'ятки і мезги насіння рицини і рицинової олії;

- числове розв'язання диференціальних рівнянь математичної моделі та їх дослідження дозволили розробити методику інженерного розрахунку основних технологічних режимів та конструкційних параметрів електрофлотаційної установки;

- визначені оптимальні технологічні режими і конструкційні параметри обладнання для волого-теплової обробки м'ятки рицини, що дозволило підвищити ступінь віджиму рицинової олії;

- отримані умови стійкості різницевих рівнянь, побудовано алгоритми розрахунків і створено програмний комплекс, що може використовуватись для розрахунку динаміки і кінетики тепло-масопереносу і фазових перетворень в процесі жаріння дисперсного шару будь-якої олійної сировини в багаточанних жаровнях безперервної дії циліндричної конфігурації з довільними геометричними параметрами;

- обґрунтовано основні технологічні режими і конструкційні параметри гвинтового преса для віджиму олії із рицинової мезги. Це дозволило підвищити

ефективність переробки рицини і зменшити відсоток олії, що залишається в макусі, із 8% до 3%.

- розроблено лабораторну установку для очищення віджатої рицинової олії (Патент України на корисну модель №127279). Конструкторську документацію передано ПрАТ «Уманьферммаш» (Акт впровадження від 10.09.2018р.);

- розроблено спеціальний лабораторний комплекс, який дозволяє визначити оптимальні технологічні режими і конструкційні параметри технологічного обладнання, придатного для насіння будь-якої олійної культури (патенти України на корисну модель №114607, № 115325, №118672;

- удосконалено технологію глибокої переробки рицини для умов малотонажного підприємства і узгоджено його із заводом-виробником технологічного обладнання для переробки насіння олійних культур ТОВ «Уманьферммаш».

Особистий внесок здобувача. Основні результати, які відображають суть дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. Постановка завдань, аналіз і трактування результатів виконано спільно з науковим консультантом.

У наукових працях написаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у:

- отриманні фізико-механічних, тепло-фізичних і технологічних характеристик насіння рицини [8,14,23];

- розробці і дослідженні математичних моделей волого-теплової обробки м'ятки, фільтрації олії через пористу перегородку «скелета» мезги із перемінною пористістю у гвинтовому пресі та гідродинаміки частинок домішок під дією електричного поля [4,6,10,17];

- розробці методик дослідження, лабораторного обладнання і проведенні експериментальних досліджень з оптимізації технологічних режимів і конструкційних параметрів технологічного обладнання[2,13,28,29,30];

- удосконаленні безекстраційної технології глибокої переробки рицини з дворазовим пресуванням, пристосованої до монотонажного виробництва [7,22,26,32];

- техніко-економічній оцінці впровадження малотонажного виробництва за удосконаленою технологією (патенти України на корисну модель №127279, №118672).

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних науково-практичних конференціях (Мелітополь, ТДАТУ, 2008 – 2017рр.); міжнародній науково-практичній конференції «Технічний сервіс в АПК» (м.Харків, ХНТУСГ, 2008р.), міжнародній науково-технічній конференції «Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві» (м.Запоріжжя ІМГ НААНУ, 2010р.), міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» пам'яті академіка П.М.Василенка (м. Луганськ ЛДАУ, 2012р.); міжнародної наукової конференції «Проблеми економічного розвитку аграрного сектора регіонів (г. Кишинев (Молдова), 2012 г.); LXIX конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних під-

розділів національного транспортного університету (м. Київ, 2013р.); міжнародній науковій конференції «Продовольственная безопасность планеты Земля (г. Пекин, Китай), 2015 г.; международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве» (г. Минск, Беларусь, 2013 г.); VI міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій пам'яті академіка І.І. Мартиненка «Енергозабезпечення технологічних процесів в агропромисловому комплексі України» – м. Мелітополь, 2015р., XVII міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки», присвяченій 116-й річниці з дня народження академіка П.М. Василенка, м. Суми, 2016р.; XIII міжнародній науковій конференції «Рациональное использование энергии в технике» Tech Energy 2017 присвяченій 116-й річниці з дня народження Момотенка М.П. – м. Київ, 2017р.; міжнародній науково-практичній конференції «Імпортозамінні технології в рослинництві і садівництві» (м. Умань, 2015–2018рр.), XI міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми конструювання виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки», м. Кропивницький, 2017р.; міжнародному науково-практичному форумі Сучасні наукові дослідження на шляху до євроінтеграції (21–22 червня 2019р., м. Мелітополь, ТДАТУ).

Публікації. Основний зміст і результати дисертаційної роботи опубліковані в 32 наукових працях. Зокрема, 15 статей у фахових виданнях, 6 статей у зарубіжних виданнях та у виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, отримано 7 патентів України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота викладена на 285 сторінках машинописного тексту формату А4 і включає вступ, 5 розділів основної частини, загальні висновки, список використаних інформаційних джерел з 261 найменування.

Робота містить 28 таблиць, 92 рисунки та 6 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Перший розділ “Стан питання та завдання дослідження”. Не дивлячись на позитивну динаміку збільшення виробництва рицини на світовому ринку в Україні ринок цієї культури відсутній, що обумовлено відсутністю потужностей для її переробки.

Найбільш перспективною стратегією створення потужностей переробки рицини для умов України є такі, які зорієнтовані на безекстракційну технологію для умов малотоннажних підприємств, оснащених сучасними апаратами. Це дозволить забезпечити виробництво конкурентоздатної рицинової олії для багатьох галузей економіки України.

Встановлено, що основні операції технології глибокої переробки рицини для умов малотоннажного виробництва є недосконалими із-за відсутності глибоких досліджень тих процесів, які лежать в основі цих операцій. Даній проблемі були присвячені роботи таких вчених, як Кошкар'єв В.А., Копейковський В.М., Кичигин В.П., Стам Г.Я. Такими технологічними операціями, насам-

перед, є операції, пов'язані із волого-тепловою підготовкою м'ятки насіння рицини до віджиму олії.

Дослідженнями в цій галузі займались Голдовський А.М., Дідур В.А., Дідух В.Ф., Котов Б.І., Кюрчев В.М., Ликов А.В., Масліков В.А., Нікітенко М.І., Самохвалов С.Е., Ткаченко В.О, Щербаков В.Г., Шевцов А.А.

До нині недостатньо вивчені волого-теплові процеси, що протікають при переробці рицини. Вони базуються на теорії тепло-масопереносу, у якій відсутні інженерні методи розрахунку апаратів для виконання технологічних операцій. Такими апаратами, насамперед, є парові жаровні, відсутність інженерних розрахунків основних режимних і конструкційних параметрів яких не дозволяє отримувати максимальний вихід олії заданої якості.

Малотоннажне виробництво рицинової олії характеризується відсутністю екстракції і, як наслідок, великими втратами олії з макухою. Величина цих втрат складає 5–8%.

Основною причиною технологічних втрат олії при її віджимі є недосконалість технологічного процесу дворазового пресування мезги в гвинтових пресах. Недосконалість технологічного процесу насамперед пов'язана із недостатнім вивченням реологічних властивостей мезги та відсутністю досліджень, які б адекватно описували сумісний процес деформації «скелета» мезги і фільтрацію олії через пористу перегородку «скелета».

Проведений аналіз механіко-технологічних та гідродинамічних основ переробки рицини в гвинтових пресах, дозволив встановити подібність процесів руху мезги у гвинтовому каналі шнека із рухом розплаву полімерів у екструдері, теорія якого достатньо повно розроблена.

Встановлено, що динаміка руху мезги будь-якої олійної сировини відрізняється від руху розплаву полімера тим, що мезга є двохфазою системою, яка складається із пористого «скелета» мезги і порової рідини у вигляді наприклад, 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 зазори зєєра корпусу преса. При цьому фільтрація олії протікає при безперервній деформації «скелета», а значить безперервній зміні пористої гелевої фази мезги. Це дозволило отримати залежності впливу технологічних і конструкційних параметрів гвинтового преса на його продуктивність і в цілому визначити їх раціональні значення. Досліджено математичну модель фільтраційного руху олії в гвинтовому пресі. Особливість цієї моделі полягає в тому, що фільтраційний рух олії протікає при безперервній деформації «скелета» мезги, а отже при безперервній зміні його пористості. Ця обставина вимагала для складання математичної моделі консолідації при віджимі олії через шар мезги в гвинтовому пресі, замість закону Дарсі, використати закон Дарсі-Герсіванова, розв'язання диференціальних рівнянь якого зводиться до вирішення задачі Діріхле-Неймана при граничних умовах Неймана. В меззі, повністю насиченій олією, співвідношення фаз в одиниці об'єму, характеризується її коефіцієнтом пористості $\varepsilon = V_{II}/V_T$. Вільне нестиснене повітря при консолідації мезги не вимагає додаткового тиску. Співвідношення об'єму олії і нестисненого повітря необхідно встановити експериментально.

Вирішення цих питань дозволить оптимізувати технологічні режими і конструкційні параметри гвинтових пресів для віджимання олії із рослинної сировини. Значний внесок в цьому напрямку мали праці таких вчених, як Братішко В.В., Войтов В.А., Гуськов К.П., Зарецький Ю.К., Копейковський В.М., Урьєв Н.Б.

Для виробництва рицинової олії згідно з вимогами ГОСТ 6757-73 обов'язковою операцією технологічного процесу є очищення рослинних олій. Тому, розвиток систем очищення та сепарації, спрямований на удосконалення існуючих і розробку нових методів та технічних засобів з метою зменшення енерго- та ресурсовитрат на процес підвищення технологічності, забезпечення якості рослинних олій при їх виробництві, є актуальною проблемою. Пошуку вирішення даної проблеми присвячені наукові праці Назаренко І.П., Войтюка В.Д., Григор'єва М.А., Жужинкова В.А., Кавецького Г.Д., Проскуракова В.А.

На основі аналізу публікацій сформована мета та задачі досліджень.

У другому розділі “Теоретичні дослідження” розглянуто моделювання процесів тепломасопереносу при підготовці м'ятки рицини до віджиму олії у багаточанній жаровні і очищення пресової рицинової олії.

Волого-теплова обробка м'ятки (жаріння) сприяє підвищенню ефективності виробництва олії та здійснюється у багаточанних жаровнях (рис. 1).

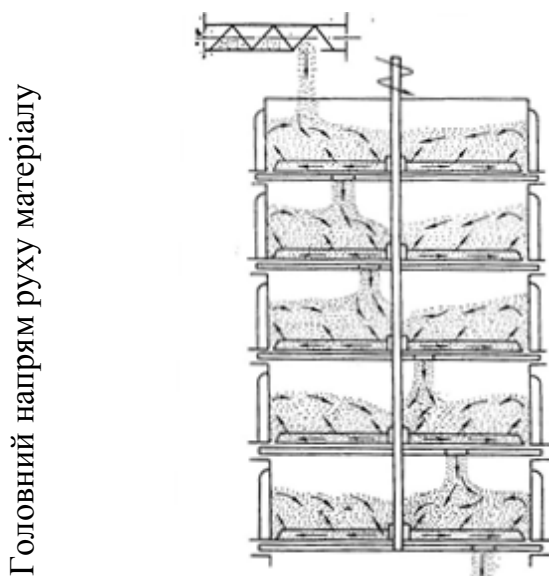


Рис. 1. Схема руху частинок м'ятки в жаровні при потоковому, безперервному жарінні.

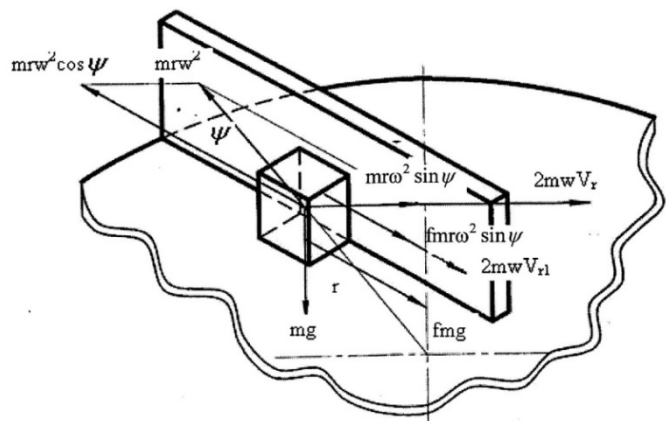


Рис. 2. Схема прикладання сил на частку м'ятки при русі по горизонтальному диску з прямими лопатками.

Кожен чан жаровні має вигляд турбінної мішалки, яка створює потік рідини що має радіальну і тангенціальну складові. На стінці апарату цей потік гальмується, змінює свій напрямок на осьовий, далі піднімається в чані до поверхні і звідси знову повертається в напрямку мішалки.

Для розуміння гідродинамічних процесів, що відбувається в чанах жаровні, необхідно знати траєкторію і швидкість переміщення мезги, які визначалися за допомогою диференційного рівняння руху частинки мезги під дією що наведені на рис. 2, а саме:

сила ваги – mg ;
 відцентрова сила – $mr\omega^2$;
 сила тертя частинки на поверхні диска – fmg ;
 сила Коріоліса – $2m\omega\xi^1$; де ξ^1 – швидкість відносного руху матеріальної точки;
 сила тертя частинок по поверхні лопатки – $2m\omega\xi^1$ з урахуванням дії наведених сил диференційне рівняння руху частинки в напрямку лопатки має вигляд

$$m\xi'' = mr\omega^2 \cos\psi - fmg + fmr\omega^2 \sin\psi - 2fm\omega\xi', \quad (1)$$

де ψ – кут ускладнений між радіальним напрямком лопатки. Розв'язання цього диференційного рівняння буде швидкість сходу частинок з лопатки.

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

де ускладнене кінцеве значення кута ψ .

де V_c і V_ξ – окружна і відносна швидкість руху частинки мезги;

f – коефіцієнт тертя частинки мезги по металу лопатки;

ω – кутова швидкість;

r_0 – відстань від початкового положення частки до центру диска;

φ_0 – початкове значення кута φ ;

λ_1 і λ_2 – корені характеристичного рівняння;

φ_1 – кінцеве значення кута φ .

Для числового дослідження рівняння швидкості руху частинки мезги від часу були побудовані графіки залежності шляху частинки мезги від часу в межах частоти обертання мішалки від 21 хв^{-1} до 100 хв^{-1} . Дослідженнями цих залежностей було встановлено, що при обертах 100 хв^{-1} шлях частинки мезги по лопатці може досягти 10 м. При радіусі лопатки мішалки 0,5 м таке інтенсивне переміщення недоцільно. Частинки мезги не встигають нагріватися

Використовуючи отримані результати швидкості частинок мезги від частоти обертання турбіни, знайдено тривалість руху частинок по лопатці, визначена швидкість сходу частинок з лопатки радіусом 0,5 м залежно від кутової швидкості мішалки, що представлено в табл. 1.

Таблиця 1. Швидкості сходу частинок м'ятки з кінця лопаті мішалки від часу руху при різній частоті обертання мішалки

| Кутова швидкість обертання, хв^{-1} | 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 |

Мезга являє собою дисперсну колоїдну капілярну-пористу систему, структура якої характеризується пористістю Π частинок подрібненого насіння і порозністю $\varepsilon_{ш}$ шару, що частинки утворюють. Проміжки між ними називають транспортними порами. Пори системи частково заповнені рідиною, паром та повітрям.

Пористість і порізність мезги можна представити виразами:

$$\Pi = \frac{V_M - V_K}{V_M} = 1 - \frac{\rho_M}{\rho_T}; \quad \varepsilon_{ш} = \frac{V_{ш} - V_M}{V_{ш}} = 1 - \frac{\rho_H}{\rho_M}, \quad (3)$$

де V_M – об'єм пористого матеріалу;

V_K – об'єм капілярів пористого матеріалу;

$V_{ш}$ – об'єм дисперсного шару;

ρ_H – насипна густина (маса вільно насипних частинок в одиниці дисперсного шару);

ρ_M – густина пористого матеріалу;

ρ_T – істинна густина пористого тіла маси одиниці об'єму пористого тіла без урахування об'єму пор (моноліту).

В основу моделі процесу тепло-масопереносу і фазових перетворень покладено диференційне рівняння Ликова-Михайлова нестационарного переносу субстанції W (маси, енергії, імпульсу) для тіл, що деформуються:

$$\frac{dw}{dt} = -\text{div}J_w + I_w - \frac{w}{1 + \varepsilon_p} \cdot \frac{\sigma \varepsilon p}{\sigma t}, \quad (4)$$

де J_w – густина потоку субстанції W ;

I_w – потужність внутрішніх джерел субстанції; ε_v – відносна об'ємна деформація тіла.

При жарінні зволоженої м'ятки в умовах переважно кондуктивного підводу енергії та самопропарювання в товстому шарі, температура м'ятки та її вологовміст змінюються повільно і відносно незначно, що дозволяє знехтувати впливом усадки на процеси переносу ($\varepsilon_v = 0$). Густина потоку субстанції враховує дифузійний J_w^o і фільтраційний J_w^f механізми переносу: $J_w = J_w^o + J_w^f$.

Дифузійний потік компоненту ψ зв'язаної речовини (рідини $\psi_{ж} = ж$, пари $\psi_{п} = п$, повітря $\psi_{в} = в$) пропорційний об'ємній концентрації U_{ψ} цього компонента та температурі тіла T : $J_{\psi}^o = -D_{\psi}(\nabla U_{\psi} + \delta_{\psi}^T \nabla T)$, де D_{ψ} , δ_{ψ}^T — коефіцієнти дифузії і термодифузії компонента ψ . Молекулярний перенос енергії в тілі відбувається у вигляді теплоти та за рахунок масопереносу: $J^d = -\lambda \nabla T + \sum_{\psi} h_{\psi} J_{\psi}^d$, де

h_{ψ} — питома ентальпія компонента ψ . Густини фільтраційних потоків компонентів ψ ($\psi_{жпв} = ж, п, в$) знаходили за виразами: $J_{ж}^f = U_{ж} w_{ж}$, $J_{п}^f = U_{п} w_{п}$, $J_{в}^f = U_{в} w_{в}$, де $w_{ж}$ і $w_{п}$ представляють собою векторні суми лінійної швидкості w_l частинок

м'ятки відносно корпусу апарата та швидкості фільтраційного руху рідинної $w_{ж}$ або газової $w_{г}$ фаз.

З врахуванням диференційного рівняння Ликова-Михайлова математична модель тепло-масопереносу і фазових перетворень при жарінні зволоженої м'ятки в кожному чані, може бути представлена в наступному вигляді:

$$c_{\text{еф}} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(w_{\text{еф}r}T)}{\partial r} + \frac{\partial(w_{\text{еф}y}T)}{\partial y} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{\text{еф}r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\text{еф}y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - LI_V, \quad (5)$$

$$\frac{\partial U_{ж}}{\partial t} + \frac{\partial(w_{жr}U_{ж})}{\partial r} + \frac{\partial(w_{жy}U_{ж})}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{жr} \frac{\partial U_{ж}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{жy} \frac{\partial U_{ж}}{\partial y} \right) - I_V, \quad (6)$$

$$\frac{\partial U_{п}}{\partial t} + \frac{\partial(w_{гр}U_{п})}{\partial r} + \frac{\partial(w_{гy}U_{п})}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{пр} \frac{\partial U_{п}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{пy} \frac{\partial U_{п}}{\partial y} \right) + I_V, \quad (7)$$

$$\frac{\partial U_{в}}{\partial t} + \frac{\partial(w_{гр}U_{в})}{\partial r} + \frac{\partial(w_{гy}U_{в})}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{вр} \frac{\partial U_{в}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{вy} \frac{\partial U_{в}}{\partial y} \right), \quad (8)$$

де $U_{ж}$, $U_{п}$, $U_{в}$ — об'ємні концентрації рідини, пари і повітря в шарі; $c_{\text{еф}}$, $\lambda_{\text{еф}}$ — ефективні теплоємність та теплопровідність, $c_{\text{еф}} = c_{т} \rho_{т} \Psi_{т} + c_{ж} U_{ж} + c_{п} U_{п} + c_{в} U_{в}$, $\lambda_{\text{еф}} = \lambda_{т} \Psi_{т} + \lambda_{ж} U_{ж} / \rho_{ж} + \lambda_{п} U_{п} / \rho_{п} + \lambda_{в} U_{в} / \rho_{в}$, $\Psi_{т}$ — об'ємна доля твердої фази у дисперсному шарі, $\Psi_{т} = (1 - \Pi)(1 - \varepsilon_{ш})$, L — питома теплота випаровування; $w_{\text{еф}k}$ — ефективна швидкість зв'язаної речовини в напрямку k ($k = y, r$), $w_{\text{еф}k} = [w_{жk} c_{ж} U_{ж} + w_{гk} (c_{п} U_{п} + c_{в} U_{в})] / c_{\text{еф}}$. Швидкість матеріалу, і відповідно компонентів ψ зв'язаної речовини відносно корпусу чанів в математичній моделі було враховано шляхом визначення зміни товщини дисперсного шару м'ятки при обертанні мішалки та збільшенням порозності шару $\varepsilon_{ш}$. Ефективний коефіцієнт дифузії рідкої фази визначали за формулою М.І. Нікітенко: $D_{ж} = \gamma_D [\exp(A_D/RT) - 1]^{-1}$.

Інтенсивність випаровування рідини на поверхні дисперсного шару, що контактує з вологим повітрям, знаходили як різницю потоків рідини, що випаровується і пари, що конденсується

$$I = \gamma_c \left\{ \varphi_{т|_{v=0}} \left(\exp \left[A / (RT|_{v=0}) \right] - 1 \right)^{-1} - \varphi_c \left(\exp \left[A / (RT_c) \right] - 1 \right)^{-1} \right\}, \quad \gamma_c = \varepsilon \rho_{ж} \frac{\delta^*}{4}, \quad (9)$$

де A — енергія активації;

ε — коефіцієнт випромінювання;

δ^* — середня довжина переміщення активізованої частинки в конденсованому шарі;

$\varphi_{т}$ — вологість газової суміші в порах тіла, яка відповідає поточному значенню $U_{ж}$;

v — нормаль до поверхні;

T_c , φ_c — параметри газового середовища.

Питому інтенсивність фазових перетворень в шарі матеріалу визначали за умови локальної тепло-фізичної рівноваги контактуючих фаз

$$I_V = \gamma_c [\exp(A/RT) - 1]^{-1} (\varphi_m - \varphi) S. \quad (10)$$

де S – площа контакту рідкої і газової фаз у частково заповнених порах одиничного об'єму шару, для визначення якої отримано формулу:

$$S = \frac{2\sqrt{1-\varphi_m}}{\rho_{жс} \delta^*} \frac{\partial U_{жс}}{\partial \varphi_m}. \quad (11)$$

Похідну $\partial U_{жс}/\partial \varphi_m$ знаходили з рівняння ізотерми десорбції. Дані, представлені по рівноважному вологовмісту олійної сировини W_p досить добре апроксимуються залежністю $W_p = 20,3\varphi_T^3 - 3,2\varphi_T^2 + 3,03$. Перехід до об'ємної концентрації здійснюється по співвідношенню $U_{жс} = 0,01 W_p \rho_T$.

Швидкості фільтрації $w_{ж}$ і $w_{г}$ знаходили по закону Дарсі: $w_{\psi} = -K_0 K_{\psi} / \eta_{\psi} \nabla P_{\psi}$, ($\psi = ж, г$), де K_0 — загальна проникність середовища, K_{ψ} — відносна проникність фази ψ ; η_{ψ} — динамічний коефіцієнт в'язкості ψ , P_{ψ} — парціальний тиск фази ψ .

Тиски $P_{ж}$ і $P_{г}$ розраховували через функції $U_{жс}$, $U_{п}$, $U_{в}$, T . На кожному етапі процесу визначали об'ємні долі рідини $\Psi_{ж}$ і газової суміші $\Psi_{г}$ в тілі: $\Psi_{ж} = U_{жс}/\rho_{жс}$, $\Psi_{г} = 1 - \Psi_{п} - \Psi_{ж}$. Далі знаходили парціальні густини $\rho_{п} = U_{п}/\Psi_{г}$, $\rho_{в} = U_{в}/\Psi_{г}$ і парціальні тиски $P_{п} = \rho_{п} R_y T / \mu_{п}$, $P_{в} = \rho_{в} R_y T / \mu_{в}$. Тиск газової суміші $P_{г} = P_{п} + P_{в}$, а рідкої фази $P_{ж} = P_{г} + P_{к}$, де $P_{к}$ — капілярний тиск. Граничні умови тепломасообміну задавали для кожної поверхні розрахункової області. На поверхні $y = H$, $0 \leq r \leq R$ контакту м'ятки з газовим середовищем чану реалізуються умови третього роду:

$$\lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=H} = \alpha (T|_{y=H} - T_c) - LI \Big|_{y=H}, \quad (12)$$

$$D_{жс} \frac{\partial U_{жс}}{\partial y} \Big|_{y=H} + \frac{\partial (w_{жс y} U_{жс})}{\partial y} \Big|_{y=H} = I \Big|_{y=H}, \quad (13)$$

$$-D_n \frac{\partial U_n}{\partial y} \Big|_{y=H} + \frac{\partial (w_{ny} U_n)}{\partial y} \Big|_{y=H} = \gamma_{n,c} (U_n|_{y=H} - \rho_{n,c} \Psi_n), \quad (14)$$

$$U_{г}|_{y=H} = \frac{P_{г} \Psi_{г} \mu_{г}}{R T|_{y=H}} - U_{в}|_{y=H} \frac{\mu_{в}}{\mu_n}, \quad (15)$$

На границі $0 \leq y \leq H$, $r = 0$ розрахункової області задавали умови симетрії полів функцій

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad \frac{\partial U_{жс}}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad \frac{\partial U_n}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad \frac{\partial U_{в}}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad \frac{\partial w_{жс r}}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad \frac{\partial w_{в r}}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (16)$$

Розв'язання системи при граничних умовах проводилось числовим методом на базі явної трьохшарової перерахункової різницевої схеми.

Похибка апроксимації має порядок $l + h^2 + h_y^2$. Необхідні умови стійкості різницевого рівнянь: $l \leq \left\{ (w_r/h + w_y/h_y)^{-1}; (1 + 2\Omega) / [2v(h^{-2} + h_y^{-2})] \right\}$, де параметр v для рівнянь приймає значення відповідно $\lambda_{\text{еф}}/c_{\text{еф}}$, $D_{\text{ж}}$, $D_{\text{п}}$, $D_{\text{в}}$, а швидкості w_r і w_y — $w_{\text{ефк}}$, $w_{\text{жк}}$, $w_{\text{гк}}$ ($k = r, y$). Розрахунковий крок за часом: $l \leq \min(l_T; l_{\text{ж}}; l_{\text{п}}; l_{\text{в}})$. Істинні об'ємні концентрації рідини $U_{\text{жі}}$, пари $U_{\text{пі}}$ та повітря $U_{\text{ві}}$ в м'ятці зв'язані з концентраціями у дисперсному шарі виразами $U_{\text{жі}} = U_{\text{ж}}(1 - \varepsilon_{\text{ш}})$, $U_{\text{пі}} = \rho_{\text{п}}(\Psi_{\text{г}} + \varepsilon_{\text{ш}})$, $U_{\text{ві}} = \rho_{\text{в}}(\Psi_{\text{г}} + \varepsilon_{\text{ш}})$.

Інактивацію ферментної системи м'ятки починають у шнеку-інактиваторі шляхом впливу протягом 30 – 40 с вологої насиченої пари, що підвищує вологовмість сировини до 9 – 10 % та температури до 85 – 90°C. У першому чані жаровні сировина ще додатково зволожується до вологовмісту 13 – 13,5 %.

В решті чанів рухомий шар (0,35 – 0,5 м) нагрітої зволоженої м'ятки піддається жарінню – тепловій обробці з поступовим її підігріванням до температури 100 – 105 °С, самопропарюванням та зневодненням до вологовмісту 5 – 6 %.

На базі представленої математичної моделі і числового методу досліджено динаміку і кінетику жаріння м'ятки рідини в дослідній семичанній жаровні з внутрішнім діаметром чанів 1 м та товщиною стінки полих днищ 0,01 м при наступних вихідних умовах: висота шару м'ятки в чанах у нерухомому стані $h = 0,21$ м, ефективна товщина рухомого шару $H = 0,5$ м забезпечується порозністю шару $\varepsilon_{\text{ш}} = 1 - h/H = 0,6$; початкові параметри м'ятки, глухої пари і контактуючого середовища: $T_0 = 83$ °С; $W_0 = 13,5$ %; $T_{\text{г.п.}} = 164$ °С, $P_{\text{г.п.}} = 0,7$ МПа; $T_c = 75$ °С; $P_c = 0,1$ МПа; $P_{\text{пс}} = 2,5$ кПа; $A = A_D = 0,4205 \cdot 10^8$ Дж/кмоль; теплофізичні властивості $c_{\text{т}} = 1,915$ кДж/(кг·К), $\lambda_{\text{т}} = 0,15$ Вт/(м·К); $\rho_{\text{м}} = 1025$ кг/м³; $\Pi = 0,385$. Тривалість обробки м'ятки в кожному чані складає 8 хв., загальний час обробки 60 хв, в якому жаріння триває 54 хв.

Графіки середніх значень вологовмісту і температури м'ятки в процесі повного циклу жаріння, отримані на основі математичного моделювання та результатів балансових розрахунків дискретних значень середнього вологовмісту м'ятки після кожного чану жаровні, представлено на рис. 3.

Поля локальних значень температури та концентрації вологи по об'єму дисперсного шару м'ятки в чанах жаровні є істотно нерівномірними.

Результати числового моделювання зміни об'ємної концентрації рідкої фази $U_{\text{ж}}$ у м'ятці по товщині шару H у перетині $r = R/2$ в момент часу 8 хв. зображено на рис. 4. Просторова сітка по товщині H будувалась на 8 кроків для кожного чану.

Концентрація рідини $U_{\text{ж}}$ у вузлових точках 9 (матеріал контактує із зовнішнім середовищем) відповідає рівноважному значенню при заданій температурі T_c і відносній вологості φ_c газового середовища в чанах.

В кожному наступному чані початкова об'ємна концентрація рідини в м'ятці нижча, ніж у попередньому – процес жаріння супроводжується зневодненням сировини.

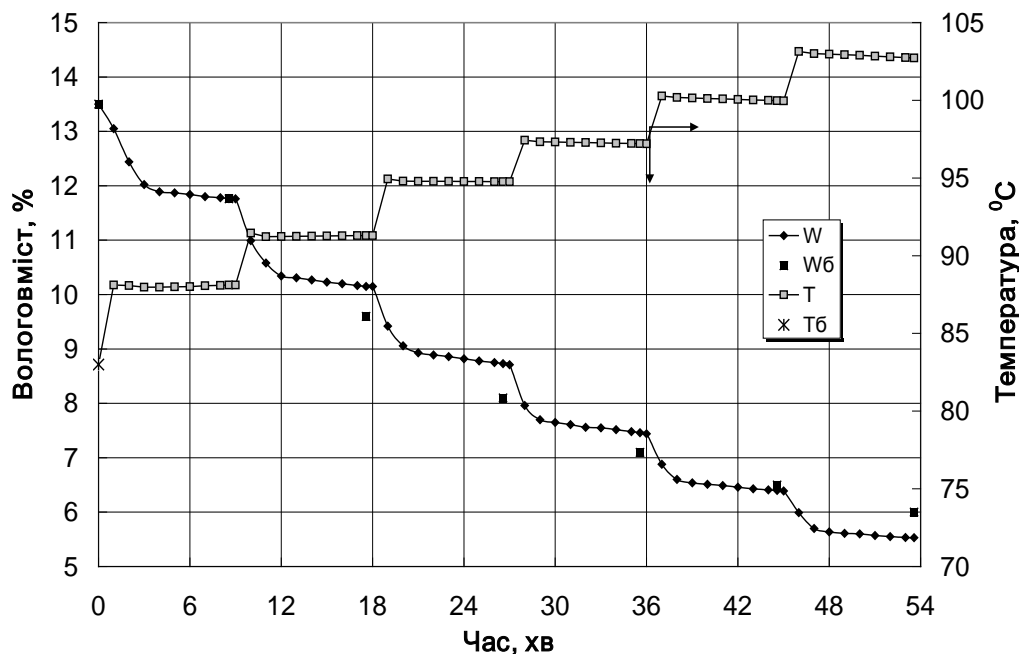


Рис.3. Зміна в часі середніх значень температури і вологовмісту м'ятки в процесі жаріння в багаточанній жаровні отримані на базі математичної моделі (лінії) та шляхом балансових розрахунків (точки).

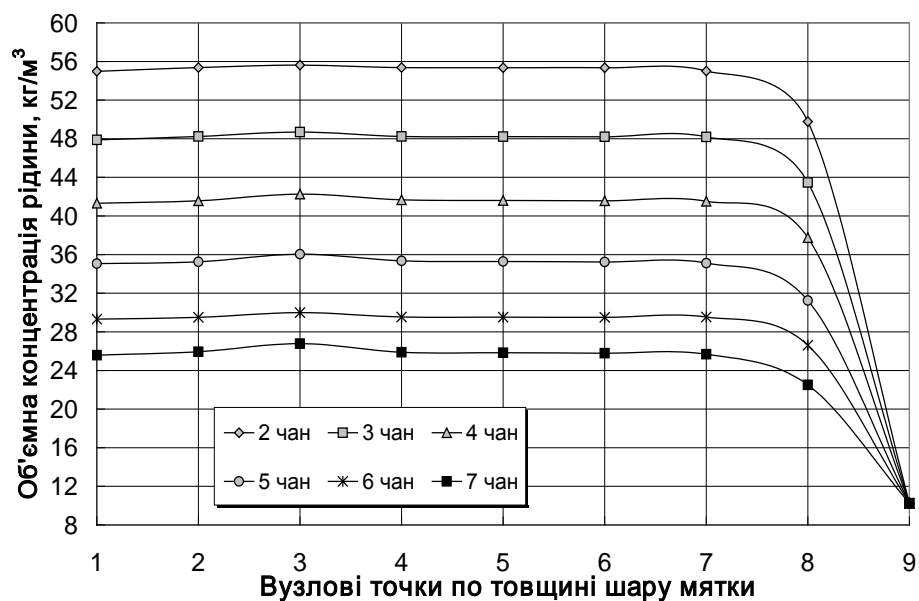


Рис. 4. Зміна об'ємної концентрації рідини $U_{ж}$ при жарінні м'ятки в перетині $r = R/2$, $0 \leq y \leq H$ у кожному чані жаровні в момент часу 8 хв.

Використовуючи результати моделювання динаміки і кінетики жаріння зволоженої м'ятки ризици отримано раціональні значення технологічних режимів і конструкційних параметрів семічанної жаровні, що відповідає малотоннажному виробництву потужністю 625кг/год (15 т/добу).

Розроблена математична модель динаміки і кінетики жаріння зволоженої м'ятки дозволяє визначати зміну температури та об'ємних концентрацій кожного компонента в будь-якій точці об'єму зволоженого дисперсного шару в довільний

момент часу, в результаті чого визначена тривалість процесу жаріння залежно 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 раціональних конструкційних параметрів при створенні відповідного обладнання.

Для очищення рослинних олій переважно використовують фільтрацію за допомогою пористої перегородки, але останнім часом йдуть пошуки нових способів очищення та їх комбінації. Серед таких комбінованих способів може бути той, що нами запропонований (патент України № 127279).

Після віджиму рицинової олії вона має багато різних домішок, в тому числі фосфатиди, білки та інші механічні домішки, які роблять її непрозорою.

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 взяли 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.

Водо-олійна 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 потрапляють 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 діаметром електроду. Такі дрібні бульбашки здатні ви-

носити 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.

Для створення математичної моделі гідродинаміки частинок домішок розглядали в'язку рідину, яка вміщує зважені частинки. Відповідно до другого закону Ньютона рівняння руху частинки в рідині має вигляд:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_e + \vec{F}_c + \vec{F}_g, \quad (17)$$

де m – маса частинки; кг;

v – швидкість руху частинки, м/с;

\vec{F}_e – сила, що діє на поляризовану незаряджену частинку в електричному полі, Н;

\vec{F}_c – сила опору в'язкої рідини руху частинки, Н;

\vec{F}_g – гравітаційна сила, Н.

Вважаємо, що частинки мають форму кулі. Гравітаційною силою нехтуємо у зв'язку з її малою величиною у порівнянні з електричною силою (рис.5).

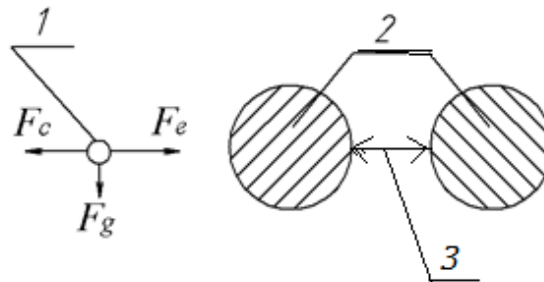


Рис. 5. Сили, що діють на частинку в електричному полі поблизу електроду: 1 – частинка гідратованих фосфатидів та домішок; 2 – електроди, 3 - відстань між осями електродів

Якщо використовувати формулу Ландау, із якої \vec{F}_c – сила опору частинки у в'язкій рідині буде дорівнювати:

$$\vec{F}_c = 6\pi\eta(\vec{v} - \vec{v}_p)a, \quad (18)$$

де \vec{v}_p – швидкість руху рідини, м/с.

\vec{F}_e – сила, що забезпечує рух краплі води та гідратованих частинок до поверхні електродів виразимо за допомогою отриманої формули:

$$\vec{F}_e = -4\pi \cdot \varepsilon_c \cdot a^3 \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_c}{\varepsilon_u + 2\varepsilon_c} U_{12}^2 \frac{D^2(2x-D)}{4 \cdot (x-D)^3 \cdot x^3 \cdot \left(\ln\left(\frac{D}{R}\right)\right)^2}, \quad (19)4$$

де ε_c – ДП середовища, Ф/м; ($3 \cdot 10^{-11}$ Ф/м);

ε_u – ДП речовини кулі, Ф/м; ($60 \cdot 10^{-11}$ Ф/м);

U – потенціал електричного поля між двома паралельними циліндрами, В;

U_{12} – різниця потенціалів між електродами;

D – відстань між осями електродів, м;

R – радіус електродів, м.

З врахуванням сил, що діють на частинку в електричному полі поблизу електроду відповідно до другого закону Ньютона при використанні формули Ландау було отримане диференціальне рівняння другого порядку руху частинки у в'язкій рідині

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{9\eta}{2a^2\rho} \left(\frac{dx}{dt}\right) - \frac{3}{\rho} \cdot \varepsilon_c \cdot \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_c}{\varepsilon_u + 2\varepsilon_c} \left(\frac{D \cdot (U_1 - U_2)}{2 \cdot \ln\left(\frac{D}{R}\right)}\right)^2 \cdot \frac{2x - D}{(x - D)^3 \cdot x^3} = 0, \quad (20)$$

Це рівняння не має аналітичного розв'язку, тому використано числове розв'язання методом Рунге-Кутти в середовищі програми MATCAD.

В результаті отримано залежності координати руху та швидкості частинки від часу при різних початкових умовах(рис.6):

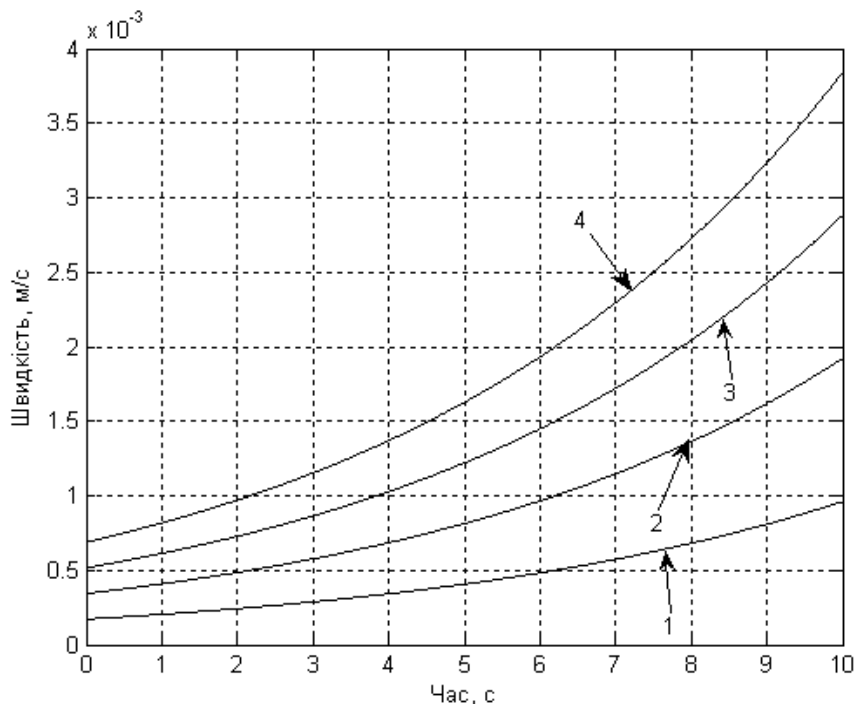


Рис. 6. Залежність швидкості від часу при початку руху з точок з координатами: 1 - 0,001 м; 2 - 0,002 м; 3 - 0,003 м; 4 - 0,004 м.

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

$\varepsilon_ч=6 \cdot 10^{-10}$ Ф/м, при в'язкості рідини $\eta=0,05$ Па·с (при $t=95^\circ\text{C}$) та $\varepsilon_с=3 \cdot 10^{-11}$ Ф/м і початковими координатами $x_{01}=1$ мм, $x_{02}=2$ мм, $x_{03}=3$ мм, $x_{04}=4$ мм.

Аналіз залежностей показав, що швидкість частинки в момент стикання з електродом при різних початкових координатах 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.7).

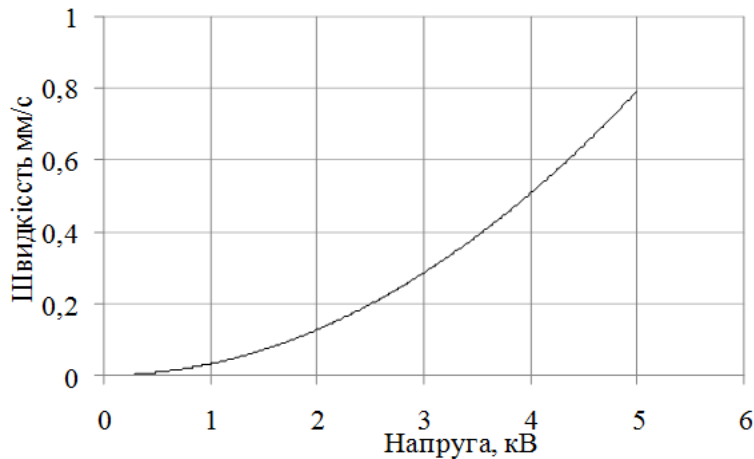


Рис. 7. Залежність швидкості частинки в момент стикання з електродом від напруги.

При роботі флотаційної камери в безперервному режимі об'єм води в одиницю часу, що подається в камеру дорівнює:

$$Q_B = N \cdot Q_c, \quad (21)$$

де Q_B – 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:

$$Q_B = \pi \cdot N \cdot v \cdot d \cdot l, \quad (22)$$

де v – швидкість руху крапель води, $\text{м}/\text{с}$;

d – діаметр електроду, м ;

l – довжина електроду, м .

отримуємо вираз для розрахунку загальної довжини електродів

$$l = \frac{Q_c}{\pi \cdot v \cdot d} \quad (23)$$

При роботі флотаційної камери в періодичному режимі зменшення об'єму води в одиницю часу, повинно дорівнювати об'єму води, що виділяється на електродах:

$$V \cdot \frac{dN}{dt} = \pi \cdot N \cdot v \cdot d \cdot l, \quad (24)$$

де V – об'єм камери, м³.

При розв'язанні цього диференціального рівняння отримуємо:

$$N = N_0 e^{-\frac{\pi v d l}{V} t}, \quad (25)$$

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 (38) можна розрахувати потрібну довжину електродів для забезпечення технологічних вимог до процесу очищення

$$l = -\frac{\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) \cdot V}{\pi \cdot v \cdot d \cdot t}, \quad (26)$$

Для перевірки математичної моделі процесу очищення рицинової олії в електричному полі було побудовано графічні залежності вмісту води в олії від часу 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. Отримані теоретичні залежності побудовані для об'єму рідини 10⁻³ м³, діаметру електродів 10⁻³ м, довжини електродів 1 м та початкового вмісту води 2 %.

Дослідження математичної моделі гідродинаміки руху парогазової бульбашки в рициновій олії при флотації їх поруч з фосфатидами та механічними домішками на поверхні, а також гідродинаміки руху гідратованої краплі води під дією сили тяжіння.

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 крапель води різного діаметру від часу та швидкості, що показані на рис. 8.

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.

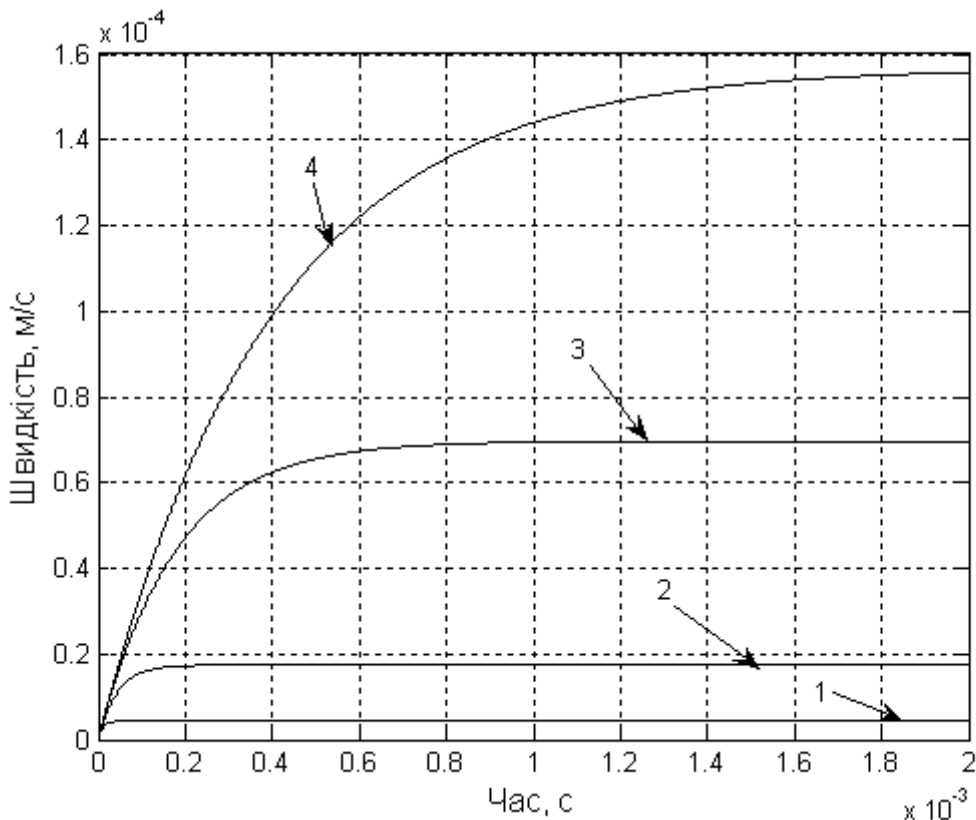


Рис. 8. Залежності швидкості руху крапель від часу осадження крапель води радіусом: 1- 50 мкм; 2 - 100 мкм; 3 - 200 мкм; 4 - 300 мкм.

Таким чином, дослідження цієї моделі дозволило встановити час вилучення домішок в процесі флотації та час осадження крапель води і гідратованих фосфатидів під час їх руху в міжелектродному просторі, що надає змогу встановити 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.

В третьому розділі "Програма і методики експериментальних досліджень" викладено програму експериментальних досліджень, описані експериментальні установки, вимірювальне обладнання, наведені методики їх проведення та обробки результатів.

Програма експериментальних досліджень передбачала встановлення:

- розмірних груп насіння рицини з метою обґрунтування раціональних зазорів між парними валками шельми шини для здійснення операції обрушення;
- впливу вологості елементів насіння рицини на інтенсивність процесів волого-теплової підготовки сировини до віджиму з неї олії;
- впливу пористості м'ятки рицини на ефективність операцій її волого-теплової підготовки та віджиму у гвинтовому пресі.
- впливу режимних параметрів волого-теплової підготовки м'ятки рицини на ступінь вилучення олії при заданій продуктивності багаточанної жаровні;

- впливу режимних параметрів віджиму мезги в гвинтовому пресі на ступінь вилучення олії при заданій продуктивності;
- впливу режимних параметрів електрофлотаційної установки на ступінь очищення олії.

Для дослідження комплексних показників ефективності технологічних процесів переробки рицини розроблено принципово нову методику за допомогою якої були визначені основні показники ефективності і розроблено експериментальну установку для їх визначення.

Набір критеріїв для оптимальних рівнів при віджимі олії запропоновано здійснювати за допомогою сукупності наступних показників

$$\mu_o \rightarrow \max; \quad \eta_M \rightarrow \min; \quad \lambda_o \geq \lambda_{o,зад}, \quad (27)$$

де μ_o – відносна кількість олії визначається як:

$$\mu_o = \frac{m_B}{m_n}, \quad (28)$$

де m_B – маса віджатої олії з заданої маси м'ятки рицини, кг;

m_n – задана маса частки знежиреної, сухої м'ятки рицини, кг;

η_M – відносна олійність макухи;

$$\eta_M = \frac{m_o}{m_{ж}}, \quad (29)$$

де m_o – маса олії, що залишилась в макусі, кг;

$m_{ж}$ – маса макухи, кг, λ_o – фактична якість олії; $\lambda_{o,зад}$ – задана якість.

Для проведення експериментальних досліджень використовували насіння рицини сорт Хортицька 7. Досліджувана сировина, (рушанка) готується з насіння рицини в двох варіантах: з обрушеного насіння (без лущиння) і з необрушеного насіння.

Відділення лущиння з обрушеного насіння здійснювали на пневмосепараторі. Подрібнення рицини в рушанку здійснювали на спеціальному однопарному вальцевому верстаті. Зазор між подрібнюючими валками, встановлювали з урахуванням фізико-механічних характеристик насіння (довжини, ширини і товщини).

Перед проведенням експериментів визначали вихідну вологість рушанки за ГОСТ 10856. Визначення комплексних показників ефективності технологічних процесів переробки рицини виконувалося на експериментальній установці, конструкційно-технологічна схема якої представлена на рис. 9. Загальний вигляд – на рис. 10.

Жаріння (зволоження і сушіння) м'ятки насіння рицини відбувається в жаровні 2. Згідно технологічного процесу, вода в парогенераторі 1 подається через відкритий прохідний регулюючий вентиль 9, додаткову ємність для води 8 і прохідний регулюючий вентиль 10. Контроль рівня води виконується за допомогою

мірного скла 7. Після досягнення необхідного рівня, води в парогенераторі 1, вентиль 9 і 10 перекриваються. Нагрівання води відбувається за допомогою трьох нагрівальних елементів 18, що знаходяться в баці парогенератора. Тиск в парогенераторі 1 контролюється за допомогою манометра 17. Аварійний тиск контролюється за допомогою запобіжного клапана 16.

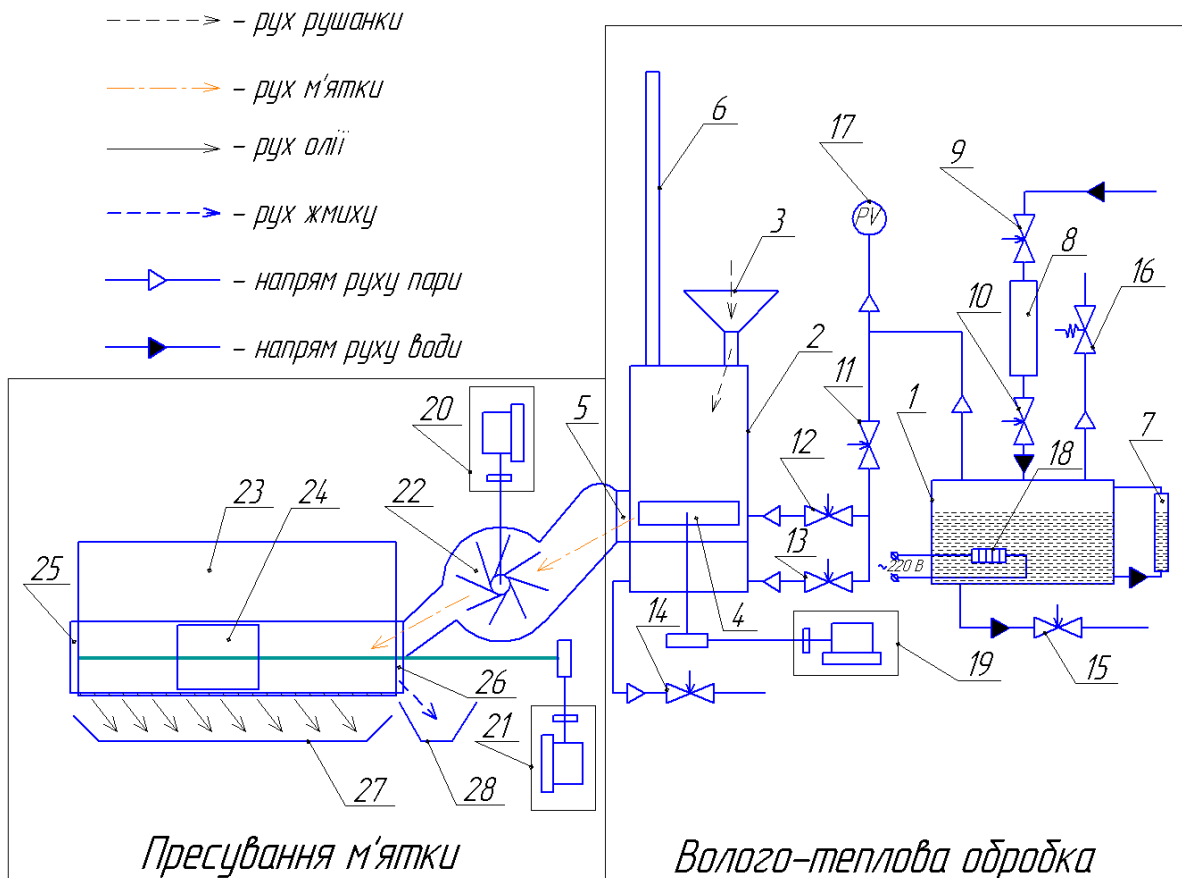


Рис. 9. Технологічна і конструкційна схема лабораторної установки для волого-теплової обробки та віджимання рицинової олії:

1 – парогенератор; 2 – жаровня; 3 – завантажувальний бункер; 4 – мішалка; 5 – вивантажувальне вікно; 6 – труба для відводу парів; 7 – мірне скло парогенератора; 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 – гвинтовий прес; 24 – поршень преса; 25–26 – вставки каналу; 27 – ємність для збору олії; 28 – ємність для збору макухи.

Рушанка насіння рицини подається в жаровню 2 через завантажувальний бункер 3. Контроль необхідного рівня рушанки забезпечується за допомогою мірної лінійки, яка вставляється в завантажувальний бункер. Перемішування рушанки під час жаріння виконується за допомогою мішалки 4, що обертається за допомогою електродвигуна з редуктором 19. Пара при жарінні відводиться через трубу для відводу пари 6. Зволоження м'ятки виконується гострим паром, який подається в чан жаровні 2 через відкритий вентиль 11 і 12. Вентиль 13 при цьому закри-

тий. Причому, вентиль 12 відкритий повністю, а вентиль 11 – відкритий на стільки, щоб тиск пари, залишався незмінним, який контролюється манометром 17.



Рис. 10. Загальний вигляд експериментального комплексу для волого-теплової обробки м'ятки і віджиму олії з олійної сировини

Сушка м'ятки здійснюється глухим паром, який подається в нижню частину жаровні через вентиля 11, 13 і 14. Для цього перекривається вентиль 12, що подає гострий пар, і відкриваються повністю вентиля 13 і 14. Положення вентиля 11 - не змінюється для заданого значення тиску. Жаріння м'ятки закінчується вивантаженням матеріалу через вивантажне вікно 5. Вентиль 15 необхідний для зливу води з парогенератора.

Віджимання олії здійснюється в пресі. Для цього, м'ятка через вивантажувальне вікно подається в бітер 22, який обертається за допомогою електродвигуна з редуктором 20. У свою чергу, бітер 22 обертаючись заштовхує м'ятку в канал гвинтового преса 23 в необхідній кількості. При цьому, поршень 24 відведено в крайнє ліве положення. З метою підтримки постійної температури м'ятки після її жаріння, канал преса попередньо нагрівається до температури 80-85°C.

Після наповнення каналу гвинтового преса 23 закривається вставка каналу 26 включається електродвигун з редуктором 21, який приводить поршень 24 в рух. Поршень 24, рухаючись вправо, здавлює м'ятку. Олія віджимається при

стисненні через зеєрні пластини (знаходяться в нижній частині пресу), потрапляє в ємність для збору олії 27. Далі слід видалити з каналу гвинтового преса 23 віджату мезгу. Знімають вставку 26, включають електродвигун з редуктором 21 для переміщення поршня 24. Відпрацьована мезга вичавлюється поршнем і виходить в нижню частину бітера 22, який має проріз для вивантаження.

При підготовці рушанки для жаріння, в жаровні визначальними параметрами є: тиск пари, $p_{гр}$, висота шару м'ятки H , початкова вологість м'ятки $W_{н}$, кінцева вологість м'ятки окремо для періодів зволоження $W_{кз}$ та сушіння $W_{кс}$. Жаровня експериментальної установки має один чан, кількість обертів мішалки жаровні 4 не змінюються, та складає 32,5 об / хв.

У різних джерелах літератури, кінцева вологість при зволоженні і сушінні м'ятки рицини має суперечливий характер. Тому, з метою проведення подальших досліджень по віджиму олії в пресі прийняті максимальні значення з обов'язковим дослідженням декількох середніх значень. Тобто, кінцева вологість м'ятки для періоду зволоження контролювалася до рівня $W_{кз} = 15\%$, кінцева вологість м'ятки для періоду сушіння – до рівня $W_{кс} = 6\%$.

Тиск пари, при дослідженнях прийнято $p_{гр} = 0,3$ МПа. 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 пресу для віджиму рицинової олії, достатня висота шару рушанки в жаровні становить 160 мм.

Продуктивність парогенератора визначали як:

$$Q_{пг} = \frac{m_{\epsilon} - m_{\epsilonп}}{t}, \text{ кг/с}, \quad (30)$$

де m_{ϵ} – маса ємності з водою перед проведенням досліджень, кг;

$m_{\epsilonп}$ – маса ємності з водою і паром після проведення досліджень, кг;

t – час, протягом якого проводилися дослідження, с.

Такі ж експерименти проводили для значень тиску $p_{гр} = 0,4$ МПа та 0,5 МПа.

Дослідження впливу конструкційних параметрів гвинтового преса на ефективність віджиму олії, метою яких є обґрунтування технологічних режимів і конструкційних параметрів гвинтового преса проводилися за допомогою спеціально виготовленого лабораторного преса. Проведення експериментів здійснювалося за допомогою спеціально сконструйованої і виготовленої експериментальної установки. Загальний вигляд установки наведено на рис. 10.

При підготовці до проведення експериментів було проведено калібрування датчиків за існуючою методикою. Приготовлена за технологічним режимом, згідно запланованого експерименту, м'ятка закладалася в попередньо підігріту до температури 80-85°C зеєрну камеру. Зеєрна камера встановлюється під прес, штовхач вставляється в зеєр. За допомогою преса через штовхач здійснюється одночасний віджим олії із мезги за запланованим раніше регламентом.

При проведенні експериментів приготовлена м'ятка засипається в зерну камеру і за допомогою штовхача, до якого додаються зусилля з боку промислового преса, створюється деформація, що викликає об'ємну напругу.

Дослідження гідродинаміки механічних домішок і фосфатидів у рициновій олії мало за мету: по-перше перевірку працездатності запропонованого нами способу очищення віджатої рицинової олії і обладнання для його забезпечення і по-друге перевірку адекватності математичної моделі процесу очищення.

Для перевірки працездатності нового способу очищення віджатої рицинової олії була спроектована і виготовлена лабораторна електрофлотаційна установка, технологічна схема, якої наведена на рис.11, а на рис.12 а наведено електрофлотаційний комплекс, що складається із двох джерел живлення напругою 220 В і джерела високої напруги до 10кВ та електродвигуна привода мішалки. На рис. 12 б наведено загальний вигляд натурального зразка електрофлотаційної лабораторної установки.

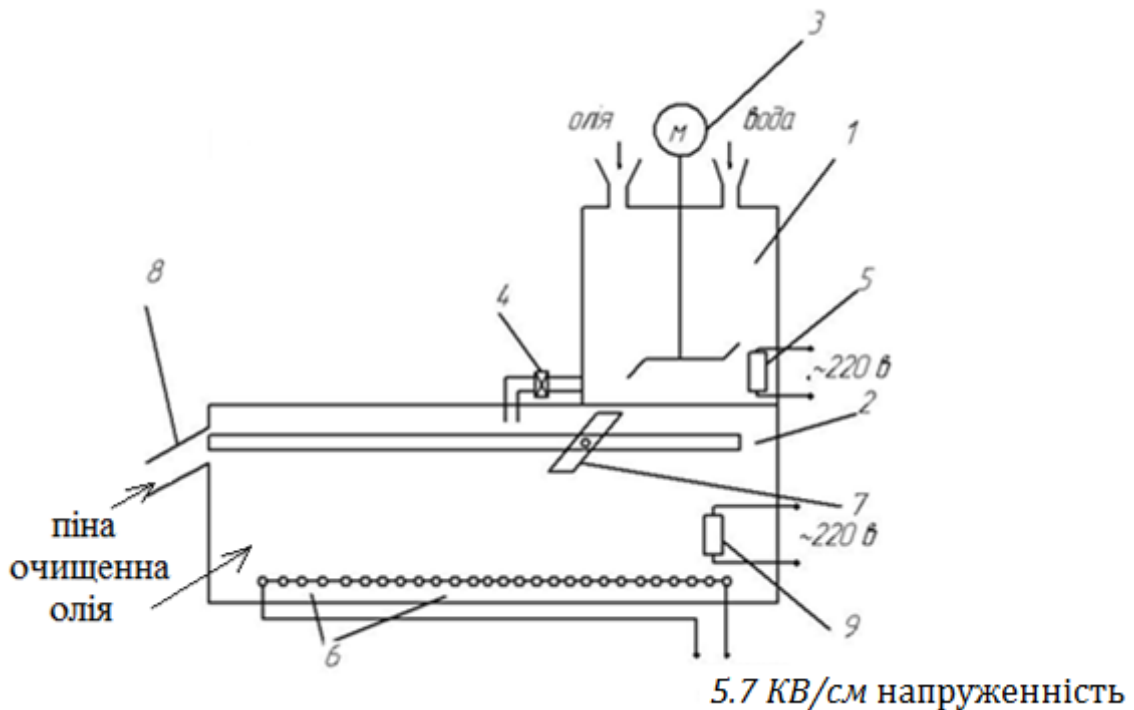


Рис. 11. Технологічна схема електрофлотаційної лабораторної установки

1 – ємність для підігріву та перемішування оли; 2 – ємність процесу флотації; 3 – електродвигун змішувача; 4 – випускний кран (клаван); 5 – нагрівальний елемент; 6 – система електродів; 7 – скребок для збору піни; 8 – отвір для виводу піни; 9 – нагрівальний елемент флотаційної ємності.

Поставлена задача вирішується тим, що в електрофлотаційній установці для очищення рослинної оли, що містить ємність процесу флотації, обладнання для видалення піни з домішками. Додатково зверху ємності процесу флотації встановлена ємність для змішування оли з водою (гідротація) за допомогою електродвигуна. Обидві ємності обладнані нагрівальними елементами та датчиками температури, в ємності процесу флотації паралельно встановлено систему електродів циліндричної форми. У встановленій ємнос-

ті відбувається процес змішування та підігріву олії з водою до стану емульсії з температурою близької до 100°C.

Система електродів в ємності процесу флотації створює в міжелектродному просторі електричне поле великої напруженості. На електродах виникають парогазові бульбашки, які разом із домішками підіймаються на поверхню рідини і видаляються. Через кожні 200 с відбирались проби для аналізу вмісту води гідратованих фосфатидів та механічних домішок. Вміст води визначався ваговим методом після випаровування, а вміст гідратованих фосфатидів та механічних домішок – центрифугуванням.

Електрофлотаційна установка складається з електродвигуна змішувача 1; ємності 2 для підігріву та перемішування олії; нагрівальних елементів 3,6; ємності 4 процесу флотації; скребок 5 для збору піни; система електродів 7; випускного крана 8, 11; датчиків температури 9,12, отвору 10 для виводу піни.

Для підтримки заданої температури в флотаційній ємності встановлено нагрівальний пристрій 6. Процес електрофлотації відбувається за допомогою встановленої системи електродів 4 у вигляді паралельно встановлених циліндрів. На електроди 7 подається змінна висока напруга від 3...5 кВ зі струмом – 10 мА, що створює в міжелектродному просторі електричне поле великої напруженості. При цьому на електродах виникають парогазові бульбашки, які разом із домішками підіймаються на поверхню рідини. З поверхні рідини домішки видаляються скребком 5 для збору піни через отвір 10 для виводу піни. Вихід очищеної олії здійснюється через випускний кран 8. Контроль температури в ємностях 2, 4 відбувається за допомогою встановлених датчиків температури 9 та 12.



а



б

Рис. 12. Електрофлотаційний комплекс (а) та електрофлотаційна установка (б) для очищення рицинової олії

У четвертому розділі "Результати експериментальних досліджень"

встановлено основні фізико-механічні, фізіологічні, технологічні та тепло- фізичні властивості насіння рицини, які є вихідними при виборі технологічної схеми і обладнання для переробки рицини в умовах малотоннажного виробництва. До основних фізико-механічних властивостей насіння рицини і її складових частин, що досліджувалися, та є важливими при підготовчих процесах переробки, відносять: геометричні характеристики; лузжистість; масу 1000 штук; сипкість маси, міцність оболонки ядра; аеродинамічні властивості лушпиння і подрібненого ядра.

Встановлено, що розміри олійних культур коливаються в широких межах в залежності від сорту і умов їх вирощування.

За розмірними характеристиками можна розрахувати об'єм, площу поверхні і коефіцієнт форми насіння рицини. Таким чином, варіаційні криві представляють собою універсальні характеристики суміші насіння по їх розмірам, що важливо при дослідженні процесів відділення оболонки від ядра.

Встановлено основні тепло-фізичні характеристики елементів насіння рицини. Визначені експериментальні залежності потенціалу вологопереносу, питомої вологотермічної масоємності ядра, оболонки, рушанки насіння рицини та їх вологовмісту у вигляді рівнянь регресії першого ступеня. Виконуючи досліди при різному початковому вологовмісті ядра, лушпиння, рушанки рицини і при 10% -му вмісті лушпиння в ядрі рицини, отримані залежності між вологовмістом досліджуваного матеріалу і потенціалом масопереносу $u=f(\theta)$ при постійній температурі $T=\text{const}$.

Аналізом залежностей встановлено, що зі збільшенням вологості повітря збільшується вміст вологи ядра і лушпиння насіння рицини. Але, при однаковій вологості повітря вологовміст буде більше в 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 менше в тої рушанки, де лушпиння буде більше. Отримані залежності використані при розробці та числовому дослідженні математичних моделей процесу жаріння м'ятки та сушіння насіння.

Виконуючи досліди при різних концентраціях сірчаної кислоти визначено енергію відриву одного моля води для даного вмісту вологи ядра, при постійній температурі $T = 20^{\circ}\text{C}$ (рис 13.)

Встановлено, що енергії на відрив 1 моля води витрачається тим більше, чим менший вологовміст в ядрі і лушпинні рицини. Таким чином, чим більше в рушанці рицини буде присутнє лушпиння, тим більше необхідно енергії на відрив 1 моля води, і тим менше часу буде витрачено на сушку в процесі жаріння, оскільки при витраті енергії виділяється теплота, яка також витрачається на сушку олійної сировини.

Енергія зв'язку вологи з лушпинням насіння рицини змінювалася від 5 до $100\text{кг}\cdot\text{м}/\text{моль}\cdot^{\circ}\text{C}$ при зміні вмісту вологи лушпиння від 0,12 кг/кг до майже нульового значення. За експериментальними даними отримані відповідні рівняння регресії. Оскільки енергія зв'язку вологи з оболонкою змінюється в широкому діапазоні вологовмісту оболонки від 0,12 кг/кг до нуля, а енергія зв'язку вологи з яд-

ром при його вологовмісті тільки від 0,045 до 0,015 кг/кг, за законом адитивності суміш ядра і оболонки насіння рицини не визначається. Однак, результати дослідження мають сенс, оскільки доводять різку відміну енергії зв'язку вологи з елементами насіння рицини від енергії зв'язку вологи їх природного змішування.

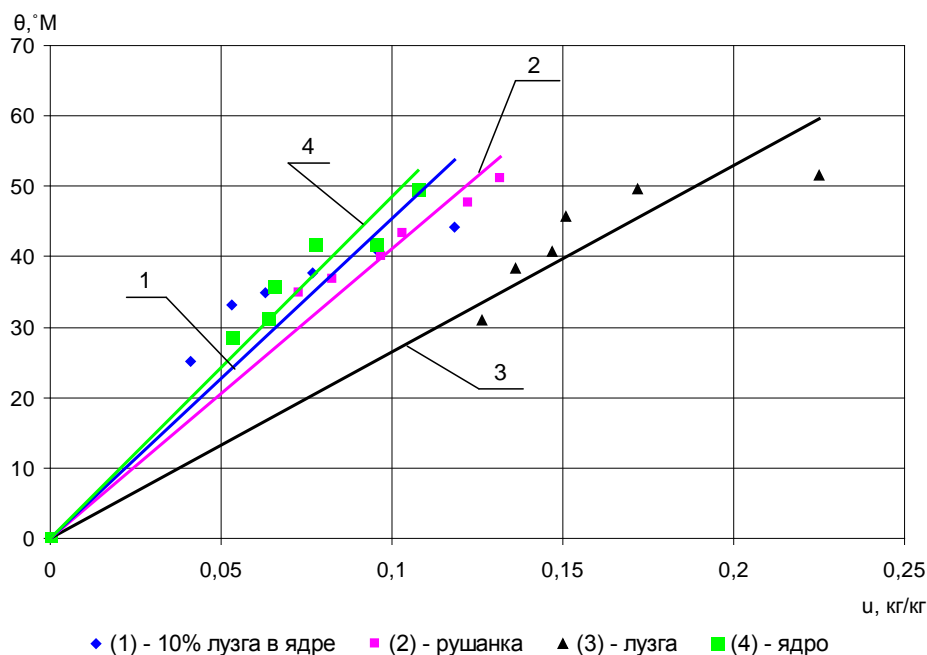


Рис. 13. Залежності потенціалу масопереносу елементів насіння рицини від їх вологовмісту.

Експериментальними дослідженнями встановлено режими волого-теплової обробки м'ятки рицини перед її пресуванням: тиск пари, що гріє становить $p_{ep}=3$ кПа; 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 протягом визначеного часу викликає змінення ряду фізико-хімічних властивостей м'ятки і олії, яка в ній міститься, що сприяє найкращому ефекту віджиму олії. 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 шляхом проведення планового експерименту з подальшою процедурою оптимізації.

$$y(m) = 12,027 + 6,412W_{к.з} - 3,334W_{к.с} + 12,759p_{ep} + 0,273W_{к.з}W_{к.с} - 1,143W_{к.з}p_{ep} - 1,760W_{к.с}p_{ep} - 0,129W_{к.з}^2 + 0,558W_{к.с}^2 + 1,132p_{ep}^2, \quad (31)$$

Для визначення точки оптимуму рівняння регресії другого порядку диференціюємо, прирівнюючи до нуля кожний фактор.

Двомірний перетин, при фіксованому факторі ($x_1=0$), характеризує $W_{к.с}, p_{зр}$. Канонічне рівняння має вигляд

$$y = 41,502 + 0,898x_2 - 3,069x_3 - 3,519x_2x_3 + 2,233x_2^2 + 1,132x_3^2, \quad (32)$$

Поверхня відгуку на рис. 14 а, представляє собою «гребінь», який витягнутий за віссю x_1 – мінімум ($W_{к.с} = 5,72\%$; $p_{зр} = 3,71 \text{кПа}$), максимальне значення в точці ($W_{к.с} = 9\%$; $p_{зр} = 3,21 \text{кПа}$).

Двомірний перетин при фіксованому факторі ($x_2=0$), характеризує ($W_{к.з}, p_{зр}$)

Рівняння має вигляд

$$y = 41,502 - 3,069x_3 - 2,285x_1x_3 - 0,515x_1^2 + 1,132x_3^2, \quad (33)$$

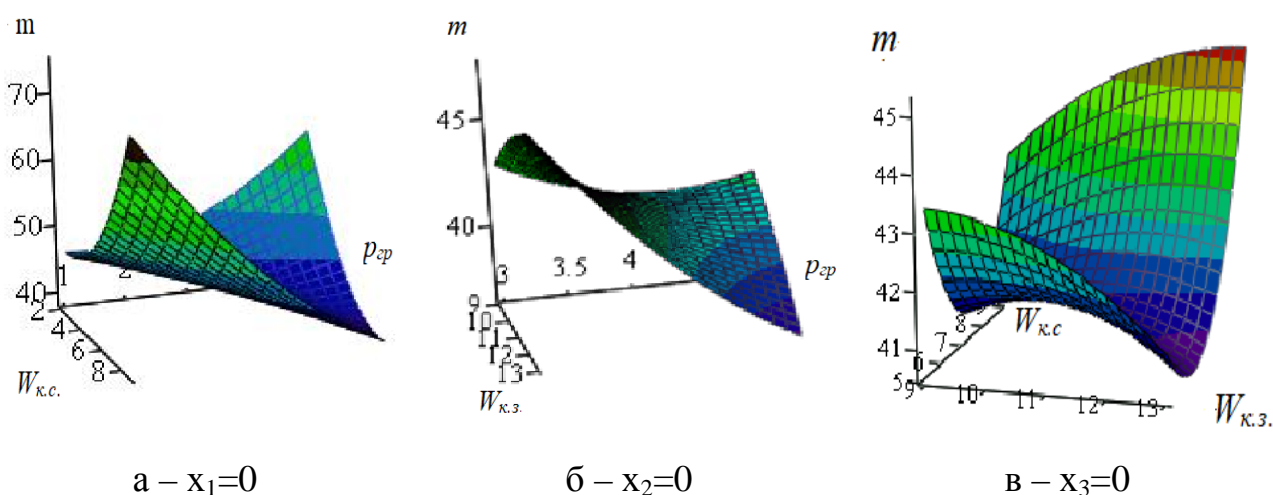


Рис. 14. Поверхня і лінії рівнів функції відгуку ($x_1=0$, $x_2=0$, $x_3=0$).

Поверхня відгуку рис. 14 б, представляє «сідло», яке витягнуто за віссю x_2 – мінімум $W_{к.з} = 9,144\%$; $p_{зр} = 4,419 \text{кПа}$.

Двомірний перетин при фіксованому факторі ($x_3=0$) характер $W_{к.з}, W_{к.с}$ рівняння має вигляд

$$y_i = 41,502 + 0,898x_2 + 1,093x_1x_2 - 0,515x_1^2 + 2,233x_2^2. \quad (34)$$

Поверхня відгуку рис. 14 в, представляє собою «сідло», яке витягнуто за віссю x_3 – мінімум ($W_{к.з} = 10,662\%$, $W_{к.с} = 6,68\%$)

Дослідження процесу віджиму рицинової олії в гвинтовому пресі проводилися насамперед шляхом вивчення реологічних властивостей мезги рицини.

На рис.15 представлені результати експериментів у вигляді графіка залежності питомого тиску від коефіцієнта пористості м'ятки. Визначено рівняння регресії четвертого ступеня цієї залежності, та характеризується коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0.998$.

$$y = 2059,9x^4 - 4033,1x^3 + 2998,6x^2 - 1043,8x + 150,4, \quad (35)$$

У формулі 36 представлена зворотна залежність, тобто залежність коефіцієнта пористості м'ятки від питомого тиску. Ця залежність виражена через рівняння регресії шостого ступеня

$$y = 9 \cdot 10^{-12} x^6 - 4 \cdot 10^{-9} x^5 + 7 \cdot 10^{-7} x^4 - 6 \cdot 10^{-5} x^3 - 0,0023x^2 - 0,0486x + 0,6389, \quad (36)$$

з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,983$.

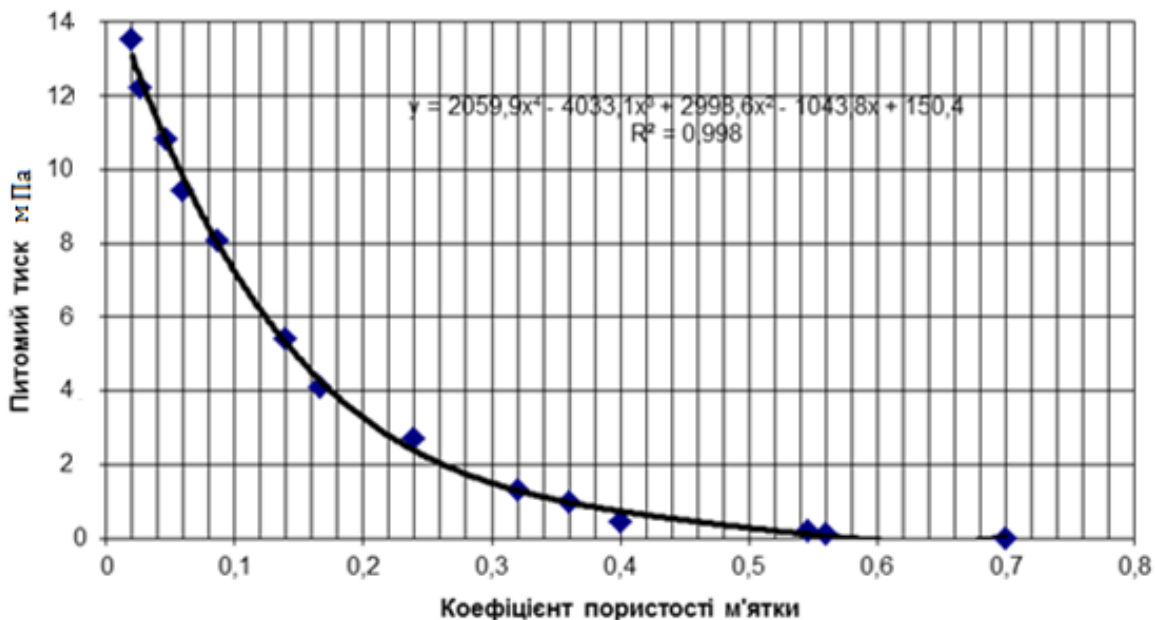


Рис. 15. Залежність питомого тиску від коефіцієнта пористості в м'ятці при температурі жаріння і пресування 90°C і вологості 6,55%.

Експериментальні дослідження впливу ступеня стиснення мезги і її коефіцієнта пористості при температурі жаріння 90°C і вологості 6,55% дозволили описати обидва процеси поліномами четвертого ступеня.

Коефіцієнт детермінації інтерпольованих поліномів склала відповідно 0,9967 і 0,998. Однак, зворотні залежності були виражені рівняннями регресії шостого ступеня. Коефіцієнти детермінації регресії становили відповідно 0,9861 і 0,9827. При визначенні часу руху частинок м'ятки по лопатці і швидкості її сходження з лопатки мішалки радіусом 0,5 м отримані відповідно рівняння регресії третього і другого ступеня. Коефіцієнти детермінації склали відповідно 0,997 і 0,99. При кожному ступені стиснення відбиралася віджата олія, визначалася її маса і об'єм в см^3 . За об'ємом відфільтрованої олії, часом витримки при кожному ступені стиснення і площі фільтрації визначалася швидкість фільтрації олії. На під-

ставі отриманих даних побудовані графіки залежностей кількості відфільтрованої олії через шар мезги (рис.16).

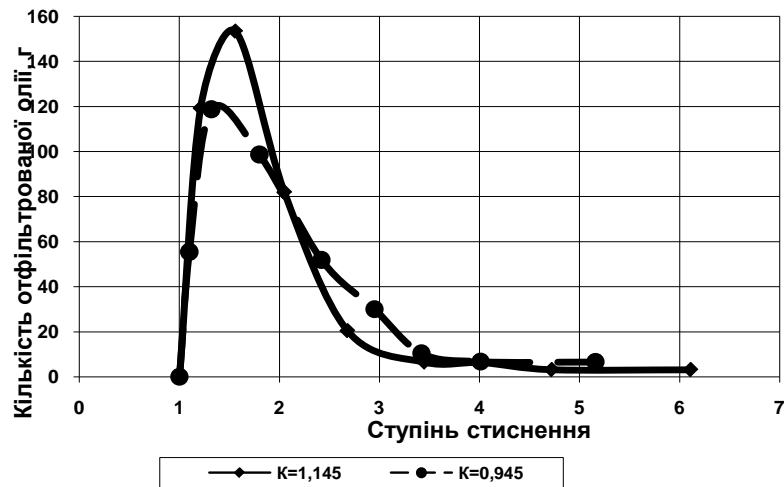


Рис. 16. Залежність кількості відфільтрованої рицинової олії через шар мезги від ступеня її стиснення в лабораторному пресі при показниках ступеня $K = 1,145$ і $K = 0,945$.

Експериментальну залежність кількості відфільтрованої олії по довжині зера в гвинтовому пресі (рис. 17) визначили на основі лабораторних досліджень за розробленої і представленої методики.



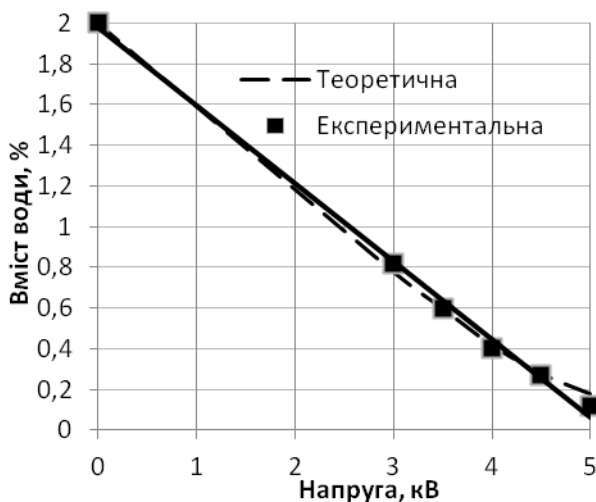
Рис. 17. Результати порівняння теоретичних і експериментальних досліджень фільтрації олії по довжині гвинтового вала преса ФП

Дослідження цієї моделі разом з моделлю віджиму олії дозволило визначити оптимальні конструкційні параметри гвинтового преса і його технологічні режими. Встановлено, що продуктивність гвинтового преса визначається різницею вимушеного обертання гвинтового вала, потоку і протivotоків обумовлених протivotис-

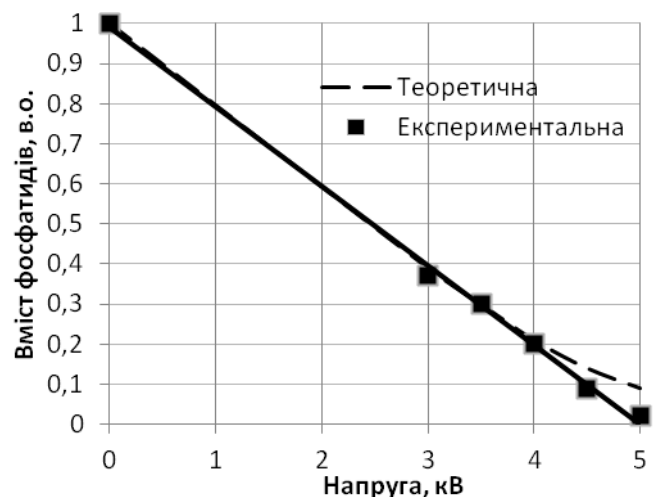
ком, який залежить від розміру щілини регульованого конусу. Оцінку величини противотоків мезги у гвинтовому пресі запропоновано виконувати шляхом визначення коефіцієнтів повернення. Коефіцієнт повернення може змінюватися від 0,5 до 0,725 при зміні ширини вихідної щілини від 6 мм до 12 мм. Визначено основні конструкційні та режимні параметри експериментального гвинтового преса продуктивністю 625 кг/год. Діаметр приймального витка складає 230 мм, крок 244 мм. Довжина 194 мм, вільний об'єм – 3,57 л. коефіцієнт заповнення 0,31. В інших семи витках вільний об'єм змінюється від 0,77 л до 0,16 л, в залежності від прийнятого закону стиснення, а отже від внутрішнього діаметра зеєра, кроку витків та їх довжини. Величина внутрішнього діаметру зеєра по ступеням від входу мезги складає: I ступінь – 175 мм; II ступінь – 140 мм; III ступінь – 155 мм; та IV ступінь – 170 мм. Кутова швидкість обертання гвинтового вала складає від 21 хв^{-1} до 45 хв^{-1} .

Таким чином, проведенні дослідження дозволили створити механіко-технологічні та гідродинамічні основи переробки рицини в гвинтовому пресі, сутність яких полягає в тому, що динаміка руху мезги будь-якої олійної сировини відрізняється від руху полімерів. Полімери у екструдері відрізняються тим, що мезга є багатофазовою системою, яка складається із пористого «скелета», порової рідини у вигляді олії, пари і газу. При гвинтовому русі мезги по гвинтовому пресу одночасно протікають два фізичні процеси: пресування пористого «скелета» мезги і фільтрація олії через шар цього «скелету» і зазори зеєра корпусу преса. Причому фільтрація олії протікає при безперервній деформації «скелета», а значить безперервній зміні пористої гелевої фази мезги.

Для перевірки математичної моделі процесу очищення рицинової олії в електричному полі було побудовано графічні залежності вмісту води в рициновій олії від часу при напругах на електродах: 3 кВ; 3,5кВ; 4 кВ; 4,5кВ; 5 кВ, що відповідають швидкостям осадження на електродах 0,3 мм/с; 0,38мм/с; 0,5 мм/с; 0,63 мм/с; 0,8 мм/с, та порівняно з експериментальними даними (рис. 17 а).



а - залежності вмісту води



б - залежності вмісту фосфатидів та механічних домішок

Рис. 17. Теоретична та експериментальна залежності вмісту води, фосфатидів та механічних домішок від напруги на електродах за час 1000 с.

Отримані теоретичні залежності побудовані для об'єму рідини 10^{-3} м^3 , радіусу електродів 10^{-3} м , довжини електродів 1 м та початкового вмісту води 2%. За допомогою нагрівача оліє-водяна емульсія підігрівалась до температури $95 \dots 100^\circ \text{ С}$. після підігріву на електроди подавалась висока напруга. Через кожні 20° С відбиралися проби для аналізу вмісту води та гідратованих фосфатидів (рис. 17 б) і механічних домішок. Вміст води визначався ваговим методом після випаровування, а вміст гідратованих фосфатидів та домішок визначався методом центрифугування. Порівняння теоретичних та експериментальних залежностей підтверджують адекватність математичної моделі гідродинаміки фосфатидів та механічних домішок під дією електричного поля у міжелектродному просторі.

Таким чином, в результаті виконаного повнофакторного експерименту для процесу волого-теплової обробки м'ятки насіння рицини визначено наступні оптимальні параметри для віджимання олії з олійної:

- кінцева вологість мезги для періоду зволоження $W_{к.з} = 9,14 \dots 10,67\%$;
- кінцева вологість мезги для періоду сушіння $W_{к.с} = 5,72 \dots 6,68\%$;
- тиск пари, що гріє $p_{гр} = 3,71 \dots 4,42 \text{ кПа}$.

За експериментальними даними кількості відфільтрованої рицинової 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 гвинтового вала.

Олійність мезги по довжині гвинтового преса визначили за даними фільтрації олії. Результати отримані при продуктивності преса 2,5 т / год і вихідній олійності насіння 55% на абсолютно суху речовину. Відхилення теоретичних та експериментальних даних не перевищує 19,3%.

Отримано диференційне рівняння 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. Це пояснюється дією електричного поля і відповідної сили тільки на невеликій відстані від електроду.

Отримані теоретичні залежності швидкості осадження крапель від напруги на електродах дозволили розрахувати час видалення вологи і гідратованих фосфатидів та механічних домішок з рицинової олії та конструкційні параметри системи електродів. Порівняння теоретичних та експериментальних залежностей часу видалення вологи та гідратованих фосфатидів, та механічних домішок з рицинової олії від напруги на електродах підтвердило адекватність теоретичної моделі експериментальним даним (максимальне відхилення теоретичних величин від експериментальних не перевищує 7 %) та доцільність використання запропонованого методу очищення пресової рицинової олії від фосфатидів і механічних домішок в електричному полі (ступінь очищення за час 1000 с складає 97%).

У п'ятому розділі “Техніко-економічне обґрунтування глибокої переробки рицини на малотоннажному підприємстві” здійснено удосконалення технології отримання рослинної олії високої якості покладено введення в тех-

нологічний процес операцій на додатковому обладнанні, що підвищує ефективність процесу глибокої переробки рослинної речовини, підвищує якість очищення та забезпечує можливість отримувати олію високої якості.

Поставлена задача вирішується удосконаленням способу отримання рослинної олії високої якості. Під час сепарації і кондиціонування насіння, його обрушення і інактивації в шнеку-інактиваторі, вологотепловій обробці перед форпресуванням і експелерним пресуванням, згідно зі схемою, його додатково очищують від механічних домішок і калібрують за розмірами, перед обрушенням у триситовому сепараторі, аеросепарують рушанку, освітлюють і фільтрують олію у електрофлотаторі.

Введення у технологічний процес додаткових операцій оптимізує сам процес глибокої переробки рослинної сировини, реалізація способу представлена на кресленні технологічної лінії (рис. 18).

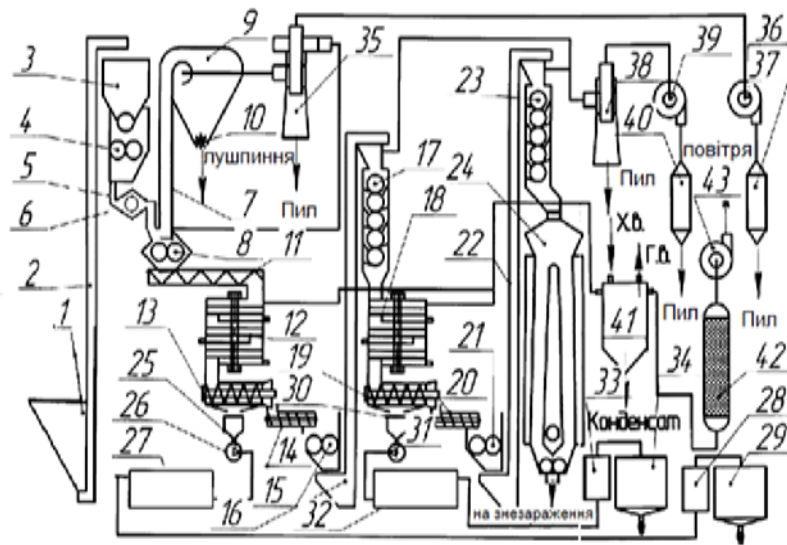


Рис. 18. Технологічна схема переробки насіння ріцини на малотоннажному підприємстві.

Приймальний бункер 1, елеватор 2, бункер шельмашини 3, однопарні вальці 4,8,15,21, повітряний сепаратор 5, коливальне днище 6, пневмосепаруючий канал 7, осадову камеру 9, вакуумний затвор 10, шнек-інактиватор 11, багато чанну жаровню 12, форпрес 13, локальний шнек 14,20, норію 16,22, п'ятивалковий станок 17,23, експелерний прес 19, охолоджувальну колнку 24, здвоєну гуще головку 25,30, насос 26,31, електрофлотатор 27, 32, трубчатий теплообмінник 28,33, бак 29,34, регульований циклон 35,40, відцентровий вентилятор 36,39,43, рукавний фільтр повітря 37, циклон 38, теплообмінник 41, адсорбер 42, завантажувальний бункер 44.

Позитивний ефект запропонованого способу полягає в підвищенні відсотку виходу олії внаслідок застосування технології калібрування насіння ріцини, що обумовлено великою розбіжністю його геометричних розмірів. Це дозволяє під кожну, отриману після калібрування, розмірну групу насіння налаштувати оптимальний зазор однопарних вальців шельмашини для його ефективного обрушення без додаткових пошкоджень ядра. Запропонований спосіб дозволяє збільшити продуктивність технологічної лінії шляхом застосування в технологічному процесі аеросепарації рушанки і фільтрації олії електрофлотаторами.

Крім цього, значно підвищується ресурс робочих органів гвинтових пресів за рахунок якості очищення насіння і рушанки від механічних домішок.

Для уловлювання пилу насіння рицини передбачена напівзамкнута система очищення повітря в шельмашині 10. Для поділу потоку застосовується регульований циклонний апарат РЦР-35 з додатково влаштованим равликовим розподільником потоку. Запилене повітря аспірується з відцентрової осадової камери шельмашини і спрямовується в регульований циклонний апарат. Тут відділяється понад 91% пилу і відбувається поділ потоку на дві частини.

Таким чином, глибина переробки рицини за запропонованою технологією відповідно до розробленої технологічної схеми адаптованої до малотоннажного підприємства дозволить забезпечити виробництво продуктів високої якості.

Техніко-економічна оцінка ефективності створення малотоннажного підприємства по глибокій переробці рицини дозволяє встановити найкращий варіант якісних показників олійної сировини. Основні техніко-економічні показники ефективності використання інвестицій для цього варіанту складають: чистий річний прибуток 87 846,7 тис. грн., рівень рентабельності 84,9%, строк окупності 6,5 років.

Запропонований спосіб передбачає створення підприємства продуктивністю 15 т/добу по початковій сировині в рік перероблятиме 4500 т насіння рицини і буде випускати 2486 т технічної рицинової олії, 1114 т рицинової кормової високо протеїнової макухи і 900 т лушпиння, яке використовуватиметься як сухе біопаливо для виробництва технологічної пари високого тиску. Чистий річний прибуток такого заводу складе близько 22,6 млн. грн.

ПрАТ«Уманьферммаш» прийняв до впровадження у виробництво науково-технічну продукцію – Спосіб отримання рослинної олії високої якості: патент України № 129046: МПК С11Вс/02; заявл. 13.02.2018; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота спрямована на розв'язання науково-технічної проблеми, яка полягає у розробці моделей і методів наукового обґрунтування технологічних режимів і конструктивних параметрів технологічного обладнання переробки рицини в умовах малотоннажного підприємства. Основні наукові та прикладні результати полягають у наступному.

1. Проведений аналіз сучасного стану світового виробництва продуктів переробки рицини показує значне зростання попиту на ці продукти. Тому створення ресурсної бази та організація переробних потужностей в Україні спрямовані на вирішення народногосподарської проблеми забезпечення вітчизняної промисловості продуктами переробки рицини. Встановлено, що найбільш доцільними є виробництва малотоннажного типу з добовою потужністю від 15 до 45 т. Доведено, що технічні можливості існуючих технологій безекстракційної переробки насіння рицини не повністю забезпечують вихід олії на рівні 90-95% від її вмісту у сировині. Для вирішення поставленої проблеми потрібно розробити технологію та обґрунтувати конструкційно-технологічні параметри засобів технічного забезпечення отримання рицинової олії.

2. Проведений аналіз теоретичних досліджень процесів переробки олійних культур показав, що розроблення безекстракційної технології переробки ри-

щини із заданими показниками якості вимагає створення наукових основ глибокої переробки насіння цієї культури із урахуванням її реологічних та теплофізичних властивостей.

3. Математичне моделювання тепломасопереносу при підготовці м'ятки рицини до віджиму олії у багаточанній жаровні дозволило отримати оптимальні значення технологічних режимів і конструкційних параметрів семичанної жаровні, прив'язаної до малотоннажного виробництва потужністю 625 кг/год.: тиск зарубашечної пари – 0,4 МПа; початкова вологість м'ятки – 13,5%, кінцева вологість – 6%; витрати зарубашечної пари – 23,67 кг/год. Кожен чан жаровні обладнаний мішалкою з двох прямих лопаток, розташованих радіально, з кутом нахилу до горизонту 32°, шириною лопатки 40 мм, частотою обертання мішалки 40 об/хв.

4. Отримані математичні моделі очищення пресової рицинової олії від гідратованих фосфатидів та механічних домішок з метою обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів електрофлотаційної установки за заданою продуктивністю для очищення форпресової олії 300кг/год, експелерної-50кг/год.

5. На підставі експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей насіння рицини встановлено, що середнє значення зусилля по руйнуванню оболонки ядра становить 419 Н. Це дало можливість визначити оптимальні значення зазорів між парними валками шельмашини залежно від розмірних груп насіння, які повинні бути на 1,2 мм меншими за товщину середньої за розміром фракції партії перероблюваного насіння.

6. В результаті експериментальних досліджень теплофізичних властивостей елементів насіння рицини встановлено, що для забезпечення оптимального режиму процесу волого-теплової обробки рицинової мезги значення її показників мають бути наступними: початкова вологість мезги для періоду зволоження $W_{кз} = 9,144-10,662\%$; кінцева вологість мезги для періоду сушіння $W_{кс} = 5,72-6,68\%$; тиск пари в парогенераторі 0,371-0,442 МПа.

7. У результаті експериментальних досліджень впливу конструкційно-технологічних параметрів віджиму мезги у гвинтовому пресі на ступінь отримання олії за заданої продуктивності отримані коефіцієнти повернення в межах 0,506-0,725 при зміні ширини вихідної щілини від 6 мм до 12 мм. Це дозволило розробити методику проектування пристосованого до малотоннажного виробництва гвинтового преса з наступними параметрами: продуктивність – 625 кг/год; діаметр приймального витка – 230 мм, крок – 244 мм, довжина – 194 мм, вільний об'єм – 3,57 л, коефіцієнт заповнення – 0,31. В інших семи витках вільний об'єм змінюється від 0,77 л до 0,16 л в залежності від прийнятого закону стиснення, а отже від внутрішнього діаметра зеєра, кроку витків та їх довжини. Величина внутрішнього діаметру зеєра по ступеням від входу мезги складає: I ступінь – 175 мм; II ступінь - 140 мм; III ступінь – 155 мм; IV ступінь – 170 мм. Кутова швидкість обертання гвинтового вала складає від $0,357\text{ с}^{-1}$ до $0,75\text{ с}^{-1}$.

8. В результаті експериментальних досліджень впливу конструкційно-технологічних параметрів електрофлотаційної установки на ступінь очищення олії розроблено спосіб та виготовлено лабораторне обладнання, яке забезпечує

ступінь очищення рицинової олії від гідратованих фосфатидів та механічних домішок на рівні 97% за напруги 5 кВ.

9. Запропоновано удосконалену безекстракційну технологію переробки рицини методом двократного пресування для умов малотоннажного виробництва, яка відрізняється від відомих технологій тим, що вона містить такі додаткові технологічні операції: калібровка насіння, пневмосепарація лушпиння та очищення віджатої олії шляхом електрофлотації.

10. Обґрунтовано показники щодо створення вихідних вимог до технічного обладнання технологічного процесу виробництва рицинової олії і кормової макухи. Доведено, що при добовій потужності малотоннажного підприємства на рівні 15 т річний дохід від реалізації готової продукції складає 14175 тис. грн., а експлуатаційні витрати дорівнюють 900 тис. грн. При цьому строк окупності капітальних вкладень становить 6,5 років.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій здобувача за темою дисертації:

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Дідур В.В., Чебанов А.Б., Дідур В.А., Назарова О.П., Верещага О.Л. Оптимізація конструктивно-технологічних параметрів шнекового преса для віджимання мезги насіння рицини (на прикладі одного витка шнекового вала) *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький, 2019, Вип. 2(33).С. 34-43 (розроблена методика і алгоритм оптимізації конструктивно-технологічних параметрів шнека наприкладі окремого витка).

2. Дідур В.В., Верещага А.Л. Методика вимірювання зусилля у шнековому 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 (розроблена схема заміру зусилля, що діє на мезгу у шнековому пресі методом тензометрування).

3. Дідур В.В., Чебанов А.Б., Дідур В.А., Верещага О.Л., Назарова О.П. Оптимізація конструктивно-технологічних параметрів шнекового 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 (розробка методики оптимізації конструктивно-технологічних параметрів шнекового преса методом планування експерименту. Визначено закон стиснення мезги по довжині шнекового вала).

4. 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 (запропонований спосіб очищення рицинової олії від механічних домішок і фосфатидів і математична модель процесу електрофлотації).

5. 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) (обґрунтування необхідних технологічних режимів волого-теплової обробки насіння рицини).

6. Дідур В. А., Ткаченко В.А., Ткаченко А. В., Дідур В.В., Асєєв А.А. Моделювання гідродинамічних процесів в багаточанній жаровні при смаженні м'ятки рицини. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. Київ, 2017. Вип. 262.С.11-25 (запропонована математична модель гідродинамічних характеристик елементів насіння рицини).

7. Дидур В. А., Дидур 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 (сформульовані проблеми, що виникають при переробці рицини в умовах малотоннажного підприємства).

8. 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 (запропонована методика дослідження термодинамічних характеристик елементів насіння рицини).

9. 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 (запропоновано варіант методики комплектування технологічних комплексів для очищення рослинних олій).

10. Ткаченко А.В., Дідур В.В., Дідур В.А., Ткаченко В.А. Математическая модель влаготепловой обработки м'ятки семян масличных культур в многоканной паровой жаровне. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2012. Вип. 12, Т.1. С. 23-35 (виконано чисельні дослідження математичної моделі волого-теплової обробки м'ятки насіння рицини).

11. 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 (розроблена математична модель процесу консолідації мезги у шнековому пресі).

12. 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 (запропоновано схему противотоків у шнековому пресі).

13. 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 (розроблено математичну модель процесу віджиму мезги в шнековому пресі).

14. 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. (розроблено математичну модель процесу сепарації рушанки насіння рицини у шельма шині).

15. 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 (розроблено методику вимірювання забрудненості дизельного палива).

16. 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. (Scopus) (розроблено математичну модель та проведені чисельні дослідження режимів жаріння м'ятки рицини).

17. Дідур 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. (Index Copernicus) (виконано чисельні дослідження математичної моделі волого-теплової обробки м'ятки насіння рицини).

18. Дідур В.А., Ткаченко В.А., Ткаченко А.В., Дідур В.В. Моделирование процессов, протекающих в шнековом прессе при консолидации мезги масличных культур. *Известия МААО*. 2013 (1). № 16. С.150–155 (розроблена математична модель процесу консолідації мезги у шнековому пресі).

19. Дідур В.А., Дідур В.В., Ткаченко В.А., Ткаченко А.В., Верещага А.Л. Проектирование шнекового пресса для отжима растительных масел методом подобию. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2018. Вип. 6. С. 7–21 (обґрунтовано коефіцієнт повернення м'ятки в пресі, що є складовою розрахунків чисельних досліджень режимів віджиму олійної сировини).

20. Дідур В.А., Ткаченко В.А., Ткаченко А.В., Дідур 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 (розглянуті якості двофазної мезги олійних культур).

21. Дідур В.А., Ткаченко В.А., Ткаченко А.В., Дідур В.В. Математическая модель кондуктивного и конвективного тепло- и массопереноса в многочанной жаровне. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. Мелітополь: Копіцент «Документ-сервіс», 2016. Вип. 4. С.14-31 (запропоновані рівняння тепло- і вологообміу в рухомому контактному шарі у гарячій поверхні днища чана багаточанної жаровні).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

22. 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) (розроблена методика оптимізації технологічних режимів волого-теплової підготовки м'ятки рицини в ба-

гаточанній жаровні, визначені оптимальні значення цих параметрів).

23. 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 (запропоновані режими термодинамічної обробки м'ятки насіння рицини).

24. 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 (розроблені рекомендації до встановлення режимів жаріння та пресування м'ятки насіння рицини багаточанній жаровні, визначені оптимальні значення цих параметрів).

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації:

25. Електрофлотаційна установка для очищення рослинної олії: пат. 188846 Україна: МПК С11Вс/02; заявл. 12.02.2019; опубл. 25.11.2019, Бюл. № 24. 6 с (запропонована ідея використання електрофлотації для очищення олії та розроблена схема лабораторної установки).

26. Спосіб отримання рослинної олії високої якості: пат. 129046 Україна: МПК С11Вс/02; заявл. 13.02.2018; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 5 с (запропонований новий спосіб очищення олії методом електрофлотації).

27. Спосіб очищення рослинної олії: пат. 127279 Україна: МПК В30В9/02; заявл. 05.02.2018; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 8. 6 с (запропонований спосіб очищення рицинової олії від механічних домішок і фосфатидів і математична модель процесу електрофлотації).

28. 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 (розроблені вимоги для конструкції шнекового преса, як складового пристрою для дослідження процесу відділення олії).

29. 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 (конструкція зеєрної камери, для дослідження процесу відділення олії з рослинної сировини).

30. 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 (запропонований спосіб дослідження процесу відділення олії з рослинної сировини включає вивчення процесів пресування мезги і фільтрації олії).

31. Електричний фільтр і спосіб його регенерації: пат. 37109 Україна. № 2000031620; заявл. 22.03.2000; опубл. 16.04.2001, Бюл. № 3. 3 с (досліджений процес регенерації електричного фільтру).

32. Наукові основи глибокої переробки насіння рицини на олію та вискобілкові корми: звіт про НДР (заключний)/ ТДАТУ; кер. В. А. Дідур. – Мелітополь, 2018. – 300 с. (розробка математичних моделей технологічних операцій волого-теплової підготовки м'ятки рицини, віджиму рицинової олії у шнековому пресі. Розробка технологічного регламенту та технологічної схеми перероб-

ки рицини на малотоннажному підприємстві)

АНОТАЦІЯ

Дідур В.В. Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння рицини в умовах малотоннажного підприємства – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва» (13 – механічна інженерія). – Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Мелітополь, 2021.

При дослідженні технологічних процесів переробки насіння рицини за основу були взяті три основних процеси, а саме: процес волого-теплової обробки м'ятки; процес віджиму олії із мезги в гвинтових пресах та процес очищення віджатої олії.

Особливістю процесу віджиму рослинних олій в гвинтовому пресі є безперервне зменшення пористості матеріалу.

Підвищення якісних показників рицинової олії і зниження її втрат у макусі кінцевого пресування досягалося шляхом раціональної волого-теплової обробки. Це забезпечує зниження зв'язку олії з гелевою частиною і підготовки раціонального поєднання пластичності і пружності структури і наступних режимів консолідації мезги при проходженні через витки гвинтового преса в зерній камері.

Процес очищення пресової олії від механічних частинок і фосфоліпідів нами представлений як процес електрофлотації передчасно гідратованої олії. Робочі гіпотези наведених процесів полягали в наступному: водяні бульбашки води, що присутні в об'ємі олії під дією електричного поля починають рухатися в міжелектричному просторі при цьому їх температура зростає. Крапля води перетворюється в газову бульбашку і переміщується на поверхню, адсорбуючи на себе фосфоліпіди та механічні домішки.

Висунуті гіпотези підтверджувались шляхом числових досліджень математичних моделей та експериментальних досліджень закономірностей впливу технологічних режимів і конструкційних параметрів обладнання на вихід олії та її якість. Підтвердження висунутих гіпотез перевірялись експериментальним шляхом за допомогою спеціально спроектованого та виготовленого обладнання.

Таким чином, в результаті виконання теоретичних і експериментальних досліджень отримані вихідні вимоги і розроблено «Технологічний регламент» для проектування технологічної лінії, і окремого обладнання для переробки рицини в умовах малотоннажного підприємства.

Підприємства продуктивністю 30 т/добу по початковій сировині в рік перероблятимуть 9000 т насіння рицини і будуть випускати 4624 т технічної рицинової олії, 2626 т рицинової кормової високопротеїнової макухи і 700 т лушпиння, яке використовуватиметься як сухе біопаливо для виробництва технологічної пари високого тиску. Чистий річний прибуток такого заводу складе близько 22,6 млн.грн.

Ключові слова: малотоннажне підприємство, м'ятка мезги, волого-теплова обробка, тепло-масоперенос, конвективний нагрів, кондуктивний нагрів,

енергія зв'язку, консолідація, фільтрація, електрофлотація, тепловий баланс, матеріальний баланс, гвинтовий прес, експелерний прес.

АННОТАЦІЯ

Дидур В.В. Механико-технологические основы глубокой переработки семян рицины в условиях малотоннажного предприятия – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.11 «Машины и средства механизации сельскохозяйственного производства» (13 – механическая инженерия). – Таврический государственный агротехнологический университет имени Дмитрия Моторного, Мелитополь, 2021.

При изучении технологических процессов обработки семян клещевины за основу были взяты три основных процесса: процесс влаго-тепловой обработки измельченных семян; процесс извлечения масла из мятки в винтовых прессах и процесс очистки отжатого масла.

Среди факторов, которые ранее не учитывались при изучении процесса влаго-тепловой обработки семян, наиболее значимыми являются: энергия связывания влаги со скелетом мезги семян и влияние гидродинамики движения мятки.

Отличительной особенностью процесса прессования растительных масел в винтовом прессе, который отличает его от явлений, которые рассматриваются в классических теориях фильтрации и миграции, является постоянное снижение пористости материала.

При исследовании процесса влаго-тепловой обработки мятки (мезги) перед прессованием принимается следующая гипотеза: механизм массопереноса внутри частиц мятки (мезги) при жарке в принципе такой же, как и при сушке (увлажнении). Однако, возможно управлять процессом воздействия влаги, тепла, механических усилий от мешалки на мятки (мезгу) и создать структуру материала, обеспечивающий благоприятный режим для отжима масла, в зависимости от технологических свойств перерабатываемых семян.

При исследовании процесса извлечения масла прессованием в шнековых прессах принимается следующая гипотеза: процесс извлечения масла в шнековых прессах можно описать общими процессами движения мезги, подобно движению полимера в каналах червячных машин, а движение масла с использованием теории фильтрации течений в грунтах с учетом особенностей технологических свойств мезги, масла и условий в зерной камере гвинтового пресса.

Процесс очистки прессового масла от механических частиц и фосфолипидов нами представлен как процесс электрофлотации преждевременно гидратированного масла. Рабочие гипотезы приведенных процессов заключались в следующем: водяные пузырьки воды, присутствующие в объеме масла под действием электрического поля начинают двигаться в межэлектрическом пространстве при этом их температура возрастает. Капля воды превращается в газовый пузырь и перемещается на поверхность, адсорбируя на себя фосфолипиды и механические примеси.

Выдвинутые гипотезы подтверждались путем многочисленных исследо-

ваний математических моделей и экспериментальных исследований закономерностей влияния технологических режимов и конструктивных параметров оборудования на выход масла и его качества. Подтверждение выдвинутых гипотез проверялись экспериментальным путем с помощью специально спроектированного и изготовленного оборудования.

Для экспериментальных исследований процесса очистки отжатого масла создан лабораторный комплекс, который включает в себя гидрататор и электрофлотатор. С помощью этого комплекса выполнена проверка адекватности математической модели динамики движения паровоздушных частиц под действием электрического поля и разработана методика расчета технологических режимов и конструктивных параметров установки для очистки отжатого масла.

Таким образом, в результате выполнения теоретических и экспериментальных исследований получены исходные требования и разработан «Технологический регламент» для проектирования технологической линии, и отдельного оборудования для переработки клещевины в условиях малотоннажного предприятия. Предприятие производительностью 30 т / сутки по исходному сырью в год будет перерабатывать 9000 т семян клещевины и будет выпускать 4624 т технического касторового масла, 2626 т касторового кормового высоко протеинового жмыха и 700 т шелухи, которая будет использоваться как сухое биотопливо для производства технологического пара высокого давления. Чистая годовая прибыль такого завода составит около 22,6 млн.грн.

Ключевые слова: малотоннажное предприятие, мятка, мезга, влаготепловая обработка, тепло-массоперенос, конвективный нагрев, кондуктивный нагрев, энергия связи, консолидация, фильтрация, электрофлотация, тепловой баланс, материальный баланс, шнековый пресс, экспелерный пресс.

ABSTRACT

Didur V.V. Mechanical and technological bases of deep processing of castor seeds in the conditions of small tonnage enterprise

Dissertation for obtaining the Scientific Degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 050511 «Machines and means of mechanization of agricultural production (13 – Mechanical engineering) – Dmytro Motorny Tavrria State Agrotechnological University, Melitopol, 2021.

During the study of technological processes of castor seed processing, three main processes were taken as a basis, namely: the process of wet-heat treatment of gritted seeds; the process of oil extraction from the pulp in screw presses and the process of cleaning of pressed oil.

Among the factors that previously were not taken into account when studying the process of wet-heat treatment of gritted seeds, the most significant are: the energy of binding the moisture to the skeleton of gritted seeds and the influence of hydrodynamics of the movement of gritted seeds in the roaster under the influence of a vane turbine located at the bottom of each vat.

Distinctive features of the process of pressing vegetable oils in a screw press,

which distinguishes it from the phenomena that are considered in the classical theories of filtration and migration, is a continuous decrease in the porosity of the material.

When studying the process of extracting oil by pressing in screw presses, the following hypothesis is accepted: the process of extracting oil in screw presses can be described by general processes of movement of the pulp, like the movement of polymer in the channels of worm machines, the movement of oil using the theory of filtering currents in soils taking into account special features of the pulp, oil and conditions in the pressing cage chamber of the screw press.

The process of cleaning press oil from mechanical particles and phospholipids is presented as the process of electroflotation of prematurely hydrated oil. The working hypotheses of the above processes are as follows: the water bubbles which are present in the volume of oil under the action of an electric field begin to move in between the electrical space while their temperature increases. In this case, a drop of water turns into a gas bubble and moves to the surface, adsorbing phospholipids and mechanical impurities on it.

These hypotheses were confirmed by numerous studies of mathematical models and experimental studies of the patterns of influence of technological regimes and design parameters of equipment on the oil yield and its quality. Confirmation of the hypotheses put forward was tested experimentally with the help of specially designed and manufactured equipment.

For experimental studies of the process of cleaning the pressed oil, a laboratory complex including a hydrator and an electric flotation unit has been developed. With the help of this complex, the adequacy of the mathematical model of the dynamics of the movement of vapor-air particles under the action of an electric field was tested and a method was developed for calculating the technological regimes and design parameters of the installation for cleaning pressed oil.

Thus, as a result of the implementation of theoretical and experimental studies, initial requirements have been obtained and a “Technological regulation” has been developed for the design of a technological line, and separate equipment for castor processing in the light-tonnage enterprise.

Enterprises with the capacity of 30 tons per day of feedstock per year will process 9000 tons of castor seeds and will produce 4624 tons of technical castor oil, 2626 tons of castor fodder high protein meal and 700 tons of husk, which will be used as dry nature-friendly fuel for the production of high-pressure process steam. The net annual profit of such an enterprise will be about 22.6 million UAH.

Key words: low-tonnage enterprise, gritted seeds, pulp, wet-heat treatment, heat and mass transfer, convective, conductive heating, binding energy, consolidation, filtration, electrical flotation, heat balance, material balance, screw press, expeller press.

Підписано до друку 01.04.2021 р. Зам. № 112 Формат 60x84x 1/16.
Умовн. – друк. арк. 2,5. Наклад 100 прим. Віддруковано в Таврійському
державному агротехнологічному університеті імені Дмитра Моторного
Адреса: 72312, Запорізька обл., м. Мелітополь, пр-т Б.Хмельницького, 18