

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Соловйов Максим Ігорович

УДК 621.928.9:628.54:663.49:636.085

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ
ГІДРОЦИКЛОНА–ЗГУЩУВАЧА ДЛЯ
ЗНЕВОДНЕННЯ ПИВНОЇ ДРОБИНИ ПРИ
КОРМОПРИГОТУВАННІ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Соловйов М.І.

Керівник роботи

Міненко С.В.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Соловйов Максим Ігорович. Обґрунтування конструкції гідроциклона-згущувача для зневоднення пивної дробини при кормоприготуванні. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Обґрунтовано та розроблено перспективну конструктивно-технологічну схему і конструкцію гідроциклона-згущувача для зневоднення пивної дробини.

Виготовлено та досліджено дослідно-конструкторський зразок гідроциклона-згущувача для зневоднення пивної дробини з раціональними конструктивними параметрами: діаметр циліндричної частини гідроциклона – 220 мм, висота циліндричної частини – 200 мм, висота конічної частини – 850 мм, діаметр фільтраційної поверхні згущувача – 700 мм, діаметр підвідного патрубка гідроциклона – 50 мм.

За результатами лабораторних досліджень експериментального гідроциклона-згущувача для зневоднення пивної дробини з удосконаленим робочим процесом визначено оптимальні його конструктивні параметри: довжина фільтраційної поверхні – 530 мм, кут нахилу фільтраційної поверхні – $17,4^\circ$. Оптимальна продуктивність гідроциклона-згущувача за вихідною масою рідкої пивної дробини, за якої вологість відокремленої твердої фракції відповідає зоотехнічним вимогам, становить $Q = 10 \text{ м}^3/\text{год}$.

Ключові слова: гідроциклон-згущувач, конструкція, оптимальні параметри, фільтрація, пивна дробина.

ANNOTATION

Soloviov Maksym Ihorovych. Justification of the Design of a Hydrocyclone-Thickener for Brewer's Spent Grain Dewatering in Feed Preparation. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering.
– Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

A prospective structural and technological scheme and the design of a hydrocyclone-thickener for brewer's spent grain dewatering have been substantiated and developed.

An experimental prototype of the hydrocyclone-thickener for brewer's spent grain dewatering has been manufactured and investigated, featuring the following rational design parameters: diameter of the cylindrical section of the hydrocyclone – 220 mm, height of the cylindrical section – 200 mm, height of the conical section – 850 mm, diameter of the thickener's filtration surface – 700 mm, diameter of the hydrocyclone feed pipe – 50 mm.

Based on laboratory studies of the experimental hydrocyclone-thickener with an improved operating process, the optimal design parameters have been determined: filtration surface length – 530 mm, filtration surface inclination angle – 17.4° . The optimal performance of the hydrocyclone-thickener for the incoming mass of liquid brewer's spent grain, at which the moisture content of the separated solid fraction meets zootechnical requirements, is $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$.

Keywords: hydrocyclone-thickener, design, optimal parameters, filtration, brewer's spent grain.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ПИВОВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА.....	8
РОЗДІЛ 2. ОПИС КОНСТРУКЦІЇ ГІДРОЦИКЛОНА-ЗГУЩУВАЧА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	34
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	49
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасне тваринництво вимагає впровадження ефективних та енергоощадних технологій кормоприготування, які забезпечують раціональне використання побічних продуктів агропромислового комплексу. Одним із таких продуктів є пивна дробина — високопоживний білково-вуглеводний компонент, який широко застосовується у годівлі великої рогатої худоби та інших видів сільськогосподарських тварин. Однак одним із ключових недоліків пивної дробини є її висока початкова вологість (75–85 %), що ускладнює транспортування, короткострокове зберігання, рівномірне дозування у раціонах та значно збільшує енергетичні затрати під час подальшої переробки.

Традиційні методи зневоднення, такі як пресування, гравітаційне відстоювання або вакуумне фільтрування, часто є малоефективними, енергоємними або такими, що не забезпечують необхідної стабільності технологічного процесу. У цьому контексті гідроциклонні технології набувають дедалі більшого значення завдяки їх простоті, компактності, низьким експлуатаційним витратам, відсутності рухомих частин та здатності забезпечувати інтенсивне розділення твердих і рідких фаз під дією відцентрових сил.

Разом з тим, ефективність гідроциклонів значною мірою залежить від їх конструктивно-технологічних параметрів, таких як геометрія циліндричної та конічної частини, характеристики фільтраційної поверхні, режим подачі пивної дробини та умови її руху в апараті. Незважаючи на наявність значної кількості досліджень, питання оптимізації гідроциклона саме для згущення та часткового зневоднення пивної дробини з урахуванням її специфічних фізико-механічних властивостей (вологість, гранулометричний склад, в'язкість, кут природного укосу, коефіцієнт внутрішнього тертя тощо) залишаються недостатньо вивченими.

Таким чином, розроблення та обґрунтування конструкції гідроциклона-згущувача, який забезпечує зниження вологості пивної дробини до значень, придатних для використання у кормоприготуванні, є актуальною науково-практичною задачею. Це дозволить підвищити ефективність технологічних ліній кормоприготування, зменшити енергоспоживання, покращити логістичні та зоотехнічні показники, а також сприятиме раціональному використанню побічних продуктів пивоварної промисловості.

Мета роботи – удосконалення конструкції гідроциклона-згущувача для зниження вологості пивної дробини до концентрації, придатної для згодовування сільськогосподарським тваринам.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі наукові завдання:

- обґрунтувати та розробити конструктивно-технологічну схему і конструкцію гідроциклона-згущувача для зневоднення пивної дробини;
- виготовити дослідно-конструкторський (експериментальний) зразок гідроциклона-згущувача для зневоднення пивної дробини та визначити його основні конструктивні й технологічні параметри;
- провести лабораторні дослідження експериментального гідроциклона-згущувача для зневоднення пивної дробини з удосконаленим робочим процесом.

Об'єктом дослідження є технологічний процес зневоднення пивної дробини гідроциклоном-згущувачем.

Предмет дослідження – конструктивні та технологічні параметри гідроциклона-згущувача, що забезпечують зниження вологості пивної дробини до необхідної зоотехнічної концентрації.

Методи дослідження. Експериментальні дослідження проводилися з використанням методів планування експериментів та чинних державних стандартів. Оброблення й оформлення експериментальних даних виконано з використанням прикладних програм «Statistica 6.0», «SolidWorks» та інших.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Міненко С. В., Соловйов М.І. Аналіз існуючих конструкцій технічних засобів для обробки вторинних ресурсів пивоварного виробництва. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 352-360.

2. Міненко С.В. , Соловйов М.І., Шевчук О.А. Конструкція гідроциклона-згущувача для зневоднення пивної дробини. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). URL: <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.

2. Соловйов М. І. Результати визначення конструктивних і технологічних параметрів гідроциклона-згущувача. Покращення техніко-економічних показників тракторів під час виконання сільськогосподарських операцій. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 90-92.

Практичну значимість роботи має удосконалена конструкція гідроциклона-згущувача для зниження вологості пивної дробини до концентрації, придатної для згодовування сільськогосподарським тваринам

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 16 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 60 сторінок комп'ютерного тексту, містить 32 рисунки та 2 таблиці.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ПИВОВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1 Значення відходів пивного виробництва для кормоприготування сільськогосподарським тваринам.

Значний обсяг побічних продуктів пивоваріння може стати цінним ресурсом для годівлі тварин. Пивоварні виробляють тонни відходів – передусім зернову дробину, пивні дріжджі та інші залишки – які традиційно вважалися проблемою утилізації. Натомість у тваринництві ці відходи успішно перетворюють на дешеві корми. Використання пивоварних відходів у раціонах худоби забезпечує економію коштів на кормах і водночас сприяє екологічній утилізації відходів. Сучасні наукові й практичні дослідження підтверджують, що правильно перероблені відходи пивного виробництва здатні поліпшувати продуктивність сільськогосподарських тварин без шкоди для їхнього здоров'я. Це робить такі корми привабливими як для великих фермерських господарств, так і для дрібних виробників по всьому світу.

Основні види пивоварних відходів, що використовуються на корм: Найбільшу частку становить пивна дробина – твердий залишок солоду та зернових після вилучення цукрів із сусла. Зернова дробина («пивний жом») утворюється переважно з ячменю, але також із пшениці, кукурудзи, рису чи сорго залежно від рецептури пива. Вона містить значну частку *рослинного білка* і клітковини, адже крохмаль і цукри були відмиті в процесі пивоваріння. Свіжа мокра дробина має вологість близько 75–80%, тому концентрує у сухій речовині протеїни (близько 25–30%) та клітковину (понад 15% від маси). До її складу входять також залишкові жири (5–10%), екстрактивні речовини зерна і мінерали (особливо фосфор). Пивна дробина багата на вітаміни групи В та містить антиоксиданти-поліфеноли із зернової шкірки. Вона має приємний солодовий

аромат і смак, тому тварини охоче поїдають цей корм. За приблизними оцінками, на кожні 100 літрів звареного пива припадає до 20 кг вологих дробин, а на 1 тонну солоду утворюється 300–350 кг дробини. Таким чином, *зерновий жом становить до 85% від загальної маси відходів пивоварні*. Наприклад, у Європі щорічно утворюється близько 6–8 млн тонн пивної дробини. Цей побічний продукт здавна знаходить застосування в годівлі худоби: ще монастирі у середньовічній Європі випоювали дробину своїм тваринам. Сьогодні ж використання пивної дробини на корм – звична практика в усьому світі, особливо поблизу великих пивзаводів.

Другим за кількістю пивним відходом є пивні дріжджі – маса мікроорганізмів (*Saccharomyces cerevisiae*), що осідають після бродіння сусла. *Дріжджова біомаса* містить приблизно 40–50% сирого протеїну в перерахунку на суху речовину. Цей білок за амінокислотним складом цінний, багатий на лізин і треонін, а дріжджі також накопичують багато вітамінів (особливо групи В, в тому числі рибофлавін, ніацин, фолієву кислоту) і мінералів (фосфор, калій, магній тощо). Пивні дріжджі є *біологічно активною добавкою*: окрім поживності, вони можуть поліпшувати травлення та імунітет тварин завдяки компонентам клітинних стінок (β -глюканам, мананам) і ферментам. Пивоварні дріжджі протягом сотень років вважалися лікувальним тоніком – їх давали молодняку як джерело вітамінів. У годівлі худоби пивні дріжджі використовують або в рідкому вигляді (дріжджова суспензія), або в висушеному (порошок, гранули). *Сира дріжджова гуща* зазвичай містить ~10–15% сухих речовин і швидко псується, тому її треба або негайно згодовувати, або консервувати. Як правило, свіжі дріжджі додають у корм свиням чи великій рогатій худобі одразу після бродіння – на тих самих пивзаводах часто є договори з фермерами. Щоб уникнути бродіння в шлунку тварин, дріжджі попередньо інактивують органічними кислотами або нагріванням. Висушені пивні дріжджі – концентрований білково-вітамінний препарат, який додають у комбікорми для поросят, птиці, телят в невеликих дозах. Хоч сушіння дріжджів і дороге, але

такий продукт зручний у зберіганні й транспортуванні. У світі виробництво пивних дріжджів сягає сотень тисяч тонн на рік. Цей побічний продукт (до 10–15% від усіх пивних відходів) також активно йде на корм тваринам або на виготовлення кормових добавок.

Крім того, до побічних продуктів пивоваріння належать хмелеві залишки та солодові паростки. Хмелеві відходи утворюються після кип'ятіння сусла з шишками хмелю – це гранульована або листова маса, що відфільтровується перед бродінням пива. *Використання хмельових відходів у чистому вигляді обмежене* через їхній гіркий смак і вміст специфічних смол. Безпосередньо тваринам таку гірку масу не згодовують. Однак інколи на великих пиввиробництвах висушені відпрацьовані хмелеві дріжджі (так звані «хмелеві висівки») змішують у невеликій пропорції із зерною дробиною. Частка хмелю у такій суміші не перевищує 5%, тому гіркота не впливає на поїдання корму і не знижує його поживності. Такий прийом дозволяє утилізувати хмелеві залишки без їх утилізації на звалищі, але самі по собі вони кормової цінності майже не мають (містять до 24% протеїну в сухій масі, але дуже низько перетравлюються). Ще один суміжний продукт – *солодові паростки* (або «мальт-спрути»), які відокремлюють від пророщеного ячменю після солодження. Це висушені корінці і паростки солоду, багаті на білок (приблизно 26–28% у сухій речовині) і відносно легкоперетравну клітковину (крупні частки багаті лігніном, але загалом ~15% клітковини). Солодові паростки широко використовують у комбікормах для великої рогатої худоби та інших тварин як білково-вітамінну добавку. Вони містять також певну кількість залишкового екстрактивного цукру і мінералів. У раціонах ВРХ мальт-спрути можуть заміняти частину висівок або шроту. У пивоварній галузі паростки солоду є меншим за обсягом відходом (близько 2–4% маси солоду), але вони відомі як цінний кормовий інгредієнт і товарний продукт.

Економічна привабливість використання пивних відходів у годівлі зумовлена їх низькою вартістю порівняно зі звичними концентрованими кормами. Пивзаводи зацікавлені позбутися великої кількості відходів, тому часто

віддають дробину та дріжджі фермерам за символічну плату або навіть безкоштовно – аби лише вивезли. Для фермерів же цей побічний продукт стає дешевим джерелом протеїну та енергії. За оцінками, включення пивної дробини до раціону може знизити собівартість приросту живої маси на 5–10% залежно від цін на інші корми. Наприклад, досвід українських господарств свідчить, що при згодовуванні великій рогатій худобі дробини витрати на комбікорм скорочуються настільки, що вартість приросту ваги тварин зменшується приблизно на 9%. Дробина є дешевшою за традиційні білкові корми (шрот, макуха соєва, соняшникова), тому дає змогу економити концентрати. Ба більше, використання місцевих пивних відходів зменшує потребу в імпортних компонентах корму (як-от соєвий шрот). Це особливо важливо в регіонах, де білкові концентрати дорогі або їх бракує. Таким чином, фермери отримують вигоду у вигляді скорочення витрат на годування, а пивоварні – у вигляді вирішення проблеми відходів. До того ж, утилізація дробини на корм сприяє зменшенню екологічного навантаження: свіжі пивні відходи швидко киснуть, забруднюючи ґрунт і воду, якщо їх просто викидати. Переробка їх у продукцію тваринництва вписується в концепцію кругової економіки та сталого агровиробництва.

Поживна цінність та вплив на продуктивність тварин. Пивна дробина зарекомендувала себе як *ефективний корм для жуйних тварин*. Завдяки високому вмісту клітковини і протеїну вона відмінно доповнює раціони великої рогатої худоби, зокрема молочної. У раціонах корів дробину використовують для заміни частини концентрованих кормів і білкових добавок. Досвід показує, що введення 3–4 кг мокрої пивної дробини на добу на фуражну корову здатне збільшити добовий надій молока на 15–20%. Цей ефект пов'язаний з покращенням білково-енергетичного балансу в рубці: дрібна волога клітковина дробини легко ферментується мікрофлорою, забезпечуючи енергією, а частина протеїну дробини не розщеплюється в рубці і переходить у кишечник (так званий байпасний протеїн). За рахунок цього підвищується вміст поживних

речовин, які корова може використати для синтезу молока. Дробина багата і на *ненадлишковий азот*: вона компенсує дефіцит протеїну в об'ємлих кормах. Практика відгодівлі ВРХ показала, що бички, яким у раціон додавали пивну дробину, приростають на 10–15% швидше проти контрольних груп на звичайному кормі. Це означає скорочення терміну відгодівлі та збільшення виходу яловичини. При цьому якість м'яса не погіршується: навпаки, за рахунок дріжджових компонентів у дробині може дещо зростати вміст вітамінів групи В у продукції. Для відгодівлі молодняка великої рогатої худоби рекомендують згодовувати приблизно 1–2 кг сухої дробини на голову (або еквівалентну кількість вологої), залежно від маси тварини. Дорослим відгодівельним бикам масою понад 450 кг дають і по 3–5 кг сухої дробини на добу як частину змішаного раціону. У разі годування молочної худоби суха пивна дробина може замінити до 50–75% соєвого шроту у складі комбікорму для дійних корів без зниження надоїв. Дослідження виявили, що така заміна проходить успішно: дробина добре засвоюється коровами, підтримує високі надої і підвищує рентабельність молока. Відомо також, що пивна дробина – *молокогінний корм*, її введення в раціон часто застосовують, щоб стимулювати у корів більшу віддачу молока. Є нюанс: корови швидко звикають до смаку дробини і розраховують на неї; якщо ж раптом дробини бракує, надої можуть тимчасово впасти (описані випадки зниження удою на 30–40% при різкій відміні дробини після тривалого згодовування). Тому важливо планомірно вводити і виводити цей компонент. Загалом же, за дотримання оптимальних норм, дробина позитивно впливає на здоров'я жуйних: вона стимулює розвиток рубця у молодняка, підтримує життєдіяльність рубцевої мікрофлори і покращує апетит (ароматний солодовий присмак корму заохочує тварин поїдати більше грубих кормів).

У м'ясному скотарстві теж широко використовують пивні відходи. На відгодівлі бичків і теличок дробина слугує недорогим джерелом протеїну замість частини зернового силосу чи комбікорму. Зокрема, у раціонах відгодівельного молодняка вона компенсує нестачу азоту на пасовищах із бідними травами.

Фахівці радять давати *мокру пивну дробину* до 10–15 кг на голову на день для інтенсивно зростаючих бугайців на випасі – це покриває дефіцит білка при концентратному типі годівлі. Якщо ж тварини на стійловій відгодівлі, то частка сухої дробини становить ~15–20% усього раціону (тобто до п'ятої частини змішаного корму). В такій кількості вона цілком безпечна і не порушує баланс поживних речовин. Більші дозування потребують обережності: наприклад, дробина з сорго містить таніни, тому її не радять давати більше 8–10 кг на добу, щоб не виникло отруєння танінами. При помірному згодовуванні жодних негативних ефектів не спостерігається. Навпаки, відмічають поліпшення стану шерсті, вгодованості і середньодобових приростів худоби. Отже, пивна дробина – повноцінний компонент раціону жуйних тварин, що підвищує ефективність виробництва яловичини та молока.

Вівці та кози також добре реагують на введення пивної дробини. Козам досить додавати 5–6% *сухої дробини в раціон* (від маси сухої речовини корму), щоб відзначити помітне покращення приростів і здоров'я тварин. У вівчарстві пивну дробину використовують на відгодівлі ягнят. Досліди показали, що заміна традиційного силосу (наприклад, з сорго) на пивну дробину є вдалою з точки зору і продуктивності, і економії – баранці ростуть не гірше, а корми обходяться дешевше. Пивна дробина забезпечує молодих овець легкодоступним протеїном, що особливо важливо при відлученні і швидкому рості. Рекомендується вводити до 5–10% дробини у комбікорм для вівце-молодняка на фінішному відгодівлі. Окрім покращення середньодобових приростів, дробина позитивно впливає на шерстний покрив тварин завдяки вітамінам і мікроелементам.

У свинарстві застосування пивних відходів має свої особливості. Шлунково-кишковий тракт свиней менш пристосований до великої кількості грубої клітковини, тож рівень включення дробини у свинячі раціони обмежений. Зазвичай пивну дробину для свиней використовують у висушеному і подрібненому вигляді, додаючи до комбікормів. Дослідження і практика показують, що при включенні 5–10% *сухої пивної дробини* у раціони

відгодівельних свиней показники росту майже не змінюються. Це означає, що приблизно до 50–100 г сухого білка з кожного кілограма комбікорму можна замінити дешевим білком дробини без шкоди для приростів. У відсотковому вираженні дробиною можна покривати до 15–20% потреби свиней у протеїні на відгодівлі. Введення невеликої кількості цього компонента (близько 5% раціону) навіть підвищує продуктивність свиноматок і підсисних поросят: відзначають кращий апетит, вищу молочність свиноматок і життєздатність поросят. Для свиноматок і ремонтного молодняка часто дають *1–3 кг мокрої дробини на голову в день* разом із основним кормом. Це покращує їх кондицію і забезпечує вітамінами групи В. Молодим поросят до 30 кг живої ваги пивну дробину не згодовують, а от починаючи приблизно з 35 кг її можна поступово вводити в раціон у складі дерті чи мешанки. Велика кількість дробини (понад 10% раціону) у свиней може знижувати поїдання корму і трохи сповільнювати ріст через брак енергії та лізину, проте до помірних рівнів заміни зерна дробиною організм свиней добре пристосовується. Важливо, що пивна дробина містить відносно мало лізину, метіоніну та триптофану, тому в свинячих раціонах її завжди поєднують з іншими білковими компонентами (шротами, рибним борошном) для балансу амінокислот. У цілому, досвід свинарів у різних країнах (Україна, США, Нігерія та ін.) свідчить: використання сухої пивної дробини у комбікормах свиней дозволяє знизити витрати на відгодівлю і частково замінити дороге соєве або рибне борошно без суттєвої втрати приростів. Це підвищує рентабельність свинарства, особливо за високих цін на зерно.

У годуванні сільськогосподарської птиці пивна дробина також може бути використана, хоча тут її частка ще більш обмежена. Для птиці надлишок грубої клітковини і недостатня перетравність можуть швидко погіршити ефективність годівлі, тому дозують дробину ощадливо. Досліди з бройлерами показали, що введення *10–15% сухої пивної дробини* в комбікорм дозволяє підтримувати нормальний приріст і конверсію корму. Оптимальним рівнем вважають саме ~15% у раціоні бройлерів – при такій концентрації витрати комбікорму

знижуються, собівартість м'яса падає, а прирости залишаються порівняними з контролем. Вищі рівні (20% і більше) можуть трохи зменшувати темпи росту, але теж застосовуються у практиці, коли пріоритетом є здешевлення раціонів. Суха дробина для бройлерів слугує передусім джерелом протеїну (приблизно 26–28% КП) та певних вітамінів, проте через високу клітковину (до 12%) її надлишок небажаний. В Україні проведено дослідження з годівлі *перепелів* комбікормами з додаванням пивної дробини. Результати показали, що оптимальна частка сухої дробини у раціоні молодняку перепелів на відгодівлі становить 4%, а при поєднанні з ферментно-пробіотичною добавкою можна підвищити до 8%. За цих умов перепелята росли добре, підвищилася перетравність корму і якість м'яса, а витрати дорогого кормового білка зменшилися. Отже, навіть у птахівництві за належної балансування раціонів пивна дробина може стати корисною складовою, що здешевить корми. Водночас, її використання потребує індивідуального підходу – для несучок високі рівні клітковини небажані, тож у раціонах курей-несучок частка пивної дробини зазвичай не перевищує 5–7%.

Окрім традиційних видів тварин, пивні відходи знаходять застосування і в нетипових секторах. Приміром, *кролівництво*: кролі як травоядні добре перетравлюють клітковину, тому суху пивну дробину вводять у комбікорми для кролів на рівні до 25–30%. Досліди показали, що добавка 20–28% дробини в раціон кролів не погіршує їх продуктивності й якості м'яса, зате дозволяє суттєво скоротити використання дорожчого соєвого шроту. Розвинуте травлення у кролів дозволяє ефективно засвоювати поживні речовини дробини, а вітаміни групи В з дріжджів навіть покращують обмін речовин. Також цікаві результати отримано в аквакультурі: у *раціонах риб* пивні дріжджі та дробина можуть частково замінити рибне борошно та зернові. Наприклад, у дослідях з райдужною фореллю комбінований корм, що містив 15% пивної дробини і 20% дріжджів, показав аналогічні прирости і коефіцієнт корму, як і стандартний корм з рибним борошном. Це відкриває перспективи використання пивних відходів і в

годовлі риби, що підвищує стійкість та локальну забезпеченість кормами в рибництві. Зрештою, навіть у годівлі непродуктивних тварин (наприклад, коней) пивну дробину іноді застосовують як смакову домішку та джерело додаткової клітковини.

Технології переробки та зберігання пивних відходів відіграють ключову роль у їх успішному використанні в тваринництві. Через високу вологість та активну мікрофлору, *свіжі пивні дробини швидко псуються*: у літню спеку буквально за 2–3 дні починається кисле бродіння і пліснявіння, а за 5–7 днів корм стає непридатним. Взимку на холоді цей процес сповільнюється, але все одно вологу дробину не рекомендують зберігати довше 1–2 тижнів. Тому існує два основні шляхи: негайна годівля свіжою дробиною або консервація для тривалого зберігання. Найпростішим методом консервації є *силосування*. Вологу пивну дробину закладають у траншеї чи силосні ями, ретельно ущільнюють і ізолюють від повітря. За умов анаеробного бродіння молочнокислі бактерії швидко зброджують залишкові цукри, підкислюючи масу і пригнічуючи розвиток гнильної мікрофлори. Силос із пивної дробини готовий через ~3 тижні і може зберігатися до 6–12 місяців без помітного зниження поживності. Важливо швидко охолодити і законсервувати свіжу дробину – *закладати в силос бажано у день отримання з пивоварні*. При силосуванні пивної дробини зазвичай не потрібно ніяких хімічних консервантів чи додаткових компонентів, оскільки вона містить достатньо вологи і власних бактерій. Однак практика показує, що *додавання 2–3% меляси (патоки) або подрібнених вуглеводних матеріалів* (наприклад, подрібненої кукурудзи, вареної картоплі) прискорює молочнокисле бродіння і покращує якість силосу. Так само корисно іноді змішувати дробину з сухими матеріалами – подрібненим сіном, висівками, соломою. Це знижує вологість суміші і полегшує трамбування, а заодно збагачує силос клітковиною, що добре для рубця тварин. Наприклад, на практиці фермери успішно силосують пивну дробину разом із подрібненими кукурудзяними стеблами або сіном, перемішуючи у співвідношенні ~1:1 по вазі. Вологість такої суміші ближча до

оптимальної (60–70%), і силос виходить більш щільним. Обов'язково потрібно передбачити *дренаж стічних вод* у сховищі – надлишок рідини з дробини стікатиме, і його треба відводити, щоб не загнивав низ силосу. Правильно приготовлений силос з пивної дробини має приємний кислувато-солодовий запах, коричнюватий колір і зберігає майже всі поживні речовини вихідної дробини. Годівля силосованою дробиною так само ефективна, як і свіжою. В деяких господарствах практикують консервування дробини у *полімерних рукавах*. Спеціальні герметичні рукави дозволяють зручно зберігати вологу масу під відкритим небом до року. Наприклад, українські підприємства пропонують послуги пакування пивної дробини в поліетиленові рукави діаметром ~2 м: всередині рукава дробина ущільнюється і самонагрівається до 35–40°C, відбувається її силосування без доступу повітря. У таких умовах корм консервується і може зберігатися 6–12 місяців. Перевагою технології рукавів є мінімальні капіталовкладення (не потрібні бетонні траншеї, можна закласти будь-де), висока швидкість і герметичність пакування та зручність відбору порцій корму за потреби. Силосована у рукаві дробина не втрачає протягом року ані протеїну, ані енергії.

Альтернативний шлях – сушка пивних відходів. *Висушена пивна дробина* (з вологих 80% до залишкових 8–10% вологи) набуває стабільності при зберіганні і може транспортуватися на великі відстані. З неї виробляють товарний продукт – суху або гранульовану пивну дробину, яку продають господарствам як концентрований корм. Перевага сушіння в тому, що воно зменшує об'єм і вагу продукту приблизно в 4–5 разів, тому різко скорочуються витрати на перевезення і зберігання. До того ж, у сухому вигляді дробину можна включати в механізовану лінію змішування комбікормів, гранулювати разом з іншими компонентами. Якісно висушена дробина зберігає хімічний склад вихідного продукту (білки, жири, волокно) без втрат. Наприклад, при сонячному сушінні чи в низькотемпературній сушарці всі поживні речовини просто концентруються, але не руйнуються. В промислових умовах сушіння пивних

відходів відбувається в обертових сушильних барабанах або стрічкових сушарках при температурі $\sim 60\text{--}70^\circ\text{C}$. Зазвичай пивну дробину перед сушінням віджимають (пресують) для видалення частини води – це економить енергію. На пивзаводах встановлюють стрічкові прес-фільтри, що знижують вологість з 80% до $\sim 60\%$, а далі продукт підсушують гарячим повітрям до стабільних 10%. *Енерговитрати на сушіння* досить високі (приблизно $3\text{--}4\text{ м}^3$ газу на 1 т дробини), але в умовах великих виробництв це виправдано наявністю збуту. Деякі броварні передають мокру дробину на спеціалізовані заводи з виготовлення кормів, де її змішують з іншими відходами і висушують, одержуючи комбіновані гранули. Цікаво, що при сушінні можна одночасно додавати до дробини пивні дріжджі і хміль – так виробляють єдиний кормовий продукт. Наприклад, у практиці великих пивоварень суміш дробини (близько 95%), відпрацьованого хмелю (до 5%) і залишкових дріжджів сушать разом; дріжджі при цьому збагачують корм білком і вітамінами, а невелика кількість хмелю не шкодить його якості. Така *суха кормова суміш* часто називається «*пивним борошном*» або «*пивними гранулами*». Вона містить 25–30% протеїну, до 10% жирів і добре поїдається тваринами. Досвід свідчить, що суха пивна дробина у гранулах цілком може замінити значну частину традиційного шроту в раціонах. Як згадувалось, для дійних корів за поживністю 1 кг такої дробини еквівалентний $\sim 0,75$ кг соєвого шроту. Тому висушений продукт є повноцінною товарною кормовою добавкою. До мінусів сушіння належить лише вартість процесу; однак вона компенсується зручністю: фермер може придбати гранули і зберігати їх місяцями, додаючи в кормосуміш по потребі.

Зберігання пивних дріжджів теж потребує технологій. Свіжі дріжджі при кімнатній температурі стрімко втрачають активність, автолізується (перетравлюють самі себе, виділяючи неприємний запах) і можуть стати осередком росту бактерій. Тому рідку дріжджову масу бажано *згодовувати протягом 1–2 діб* після вилучення з бродильних танків. Якщо ж потрібно зберегти довше, дріжджі охолоджують до $+2\text{...}+4^\circ\text{C}$ – при цьому їх

життєдіяльність сповільнюється і склад лишається стабільним до тижня. Для тривалого зберігання дріжджі зазвичай висушують до порошкоподібного стану (вологість <8%). Існують промислові лінії для спреї-сушки пивних дріжджів, які випускають *кормові дріжджі* у вигляді кремового порошку. Такий продукт є концентратом білка (~45–50% протеїну) і вітамінів, який вводять у премікси і комбікорми в невеликих дозах (1–5%). В Україні пивні дріжджі сушать декілька підприємств; їхня продукція відома як «*кормові пивні дріжджі*» і користується попитом у птахівництві та свинарстві.

Вплив на здоров'я та безпеку тварин – критичний момент при використанні нетрадиційних кормів. Багаторічний досвід доводить, що за умови правильної підготовки пивні відходи не завдають шкоди худобі. *Пивна дробина вважається безпечним кормом*, якщо вона не зіпсована і внесена в раціон у розумних межах. Свіжі дробини потрібно уважно оглядати: якщо з'явилась цвіль або гнильний запах, такий корм давати не можна. На практиці силосування і сушіння вирішують проблему – консервована дробина рідко містить токсини. Відомо, що при неправильному зберіганні у вологих відходах може розвиватись пліснява *Aspergillus*, що продукує афлатоксини. Ці небезпечні мікотоксини можуть викликати отруєння худоби, з ураженням печінки та нирок. Тому фермери, які використовують кислу мокру дробину, іноді додають до раціону адсорбенти (наприклад, бентонітову глину), щоб зв'язувати можливі мікотоксини. Також рекомендується забезпечувати тварин достатньою кількістю чистої води при згодовуванні великої кількості дробини, адже вона містить багато солей і білка. *Баланс раціону* – ще один чинник безпеки: пивна дробина багата фосфором, але бідна на кальцій, тож обов'язково треба додавати крейду або інші кальцієві підкормки, аби уникнути дисбалансу Ca:P. При дотриманні цих умов жодних негативних ефектів не спостерігається: навпаки, худоба часто виглядає здоровішою, має кращий апетит, міцні копита та блискучу шерсть. Пивні дріжджі також зазвичай добре переносяться тваринами. Єдине застереження – вони повинні бути інактивовані. Живі дріжджі, якщо їх дати у

великій кількості, можуть продовжити бродіння в шлунку свині чи теляти, викликаючи здуття або діарею. Але підкислення або термообробка на пивзаводі гарантує загибель клітин перед годівлею. Інактивовані дріжджі виконують роль пробіотика: вони не ростуть у кишківнику, але стимулюють імунітет і засвоєння кормів. Тому часто відзначають, що додавання пивних дріжджів зменшує захворюваність молодняку, покращує стан шкіри і опірність інфекціям. Щодо хмелевих домішок – їхня кількість у кормах настільки мала, що не впливає на здоров'я (хоча відомо, що собакам не можна згодовувати відпрацьований хміль через ризик токсичної реакції, проте у жуйних тварин і свиней таких явищ не зафіксовано при мінімальних рівнях хмелю). Отже, за належної якості та балансування раціону, пивні відходи є *безпечною та корисною кормовою добавкою*.

Приклади практичного використання у різних країнах. У багатьох пивоварних державах існують усталені зв'язки між броварнями і фермами. В США тисячі крафтових пивоварень віддають дробину на найближчі молочні ферми або ферми великої рогатої худоби. Це вирішує проблему утилізації для пивовара і забезпечує дешевий корм фермеру – класичний приклад симбіозу. За підрахунками американських фермерів, використання пивної дробини дозволяє їм заощадити до \$0,5 на кожні 100 фунтів комбікорму, що в масштабах року дає значну суму. В Європі великі пивзаводи часто мають власні сушильні установки і продають суху дробину та дріжджі кормовим компаніям. Приміром, у Німеччині та Чехії пивні заводи випускають гранульований продукт під назвою “Treber” або “Biertreber”, який постачається на експорт як компонент кормів. В той же час у селах поряд з броварнею фермери традиційно забирають свіжі дробини для годівлі корів. У Великобританії практика годівлі пивними відходами відома понад століття: ще у XIX ст. лондонські молочні ферми знаходилися поряд з пивоварнями, що постачали їм дешевий корм. Нині британські ферми також охоче беруть дробину, а пивзаводи інформують про наявність відходів через спеціальні біржі побічних продуктів. В країнах Африки

та Азії пивні відходи стали важливим ресурсом для дрібних господарств. Наприклад, в Уганді проекти зі сталого фермерства навчають скотарів використовувати мокру пивну дробину для підгодівлі корів і козам у сухий сезон, коли бракує зеленої маси. Згідно з повідомленнями угандійських фахівців, додавання ~8 кг дробини на день покращує кондицію пасовищних корів і підвищує їх удої, а сушена дробина в складі концентрату може замінити більшу частину імпортного шроту. У Нігерії і Кенії фермери використовують пивні дріжджі як білкову добавку для свиней і птиці, зменшуючи потребу в дорогих кормових компонентах. В Індії та Китаї, де пивоварна промисловість також зростає, побічні продукти пива почали широко включати до раціонів буйволів, свиней і риб. Це знижує витрати на корми і водночас утилізує відходи, які раніше часто забруднювали водні джерела.

В Україні використання відходів пивоваріння у тваринництві набуває дедалі більшого поширення. В нашій країні працюють десятки великих пивзаводів, і поруч із ними виникають спеціалізовані підприємства з переробки дробини на корми. Деякі комбікормові заводи закуповують суху дробину та дріжджі й додають їх до формул кормів для ВРХ і свиней. Приватні фермери, особливо в містах, де є броварні, налагодили прямий вивіз свіжої дробини на свої ферми. Відомі випадки, коли молочно-товарні ферми біля великих міст (Київ, Львів) покривають до третини потреби в концентрованих кормах за рахунок безкоштовної пивної дробини від пивзаводів. Це суттєво підвищує їхню конкурентоспроможність. Українські науковці активно досліджують ефективність пивних відходів: захищено декілька дисертацій (наприклад, щодо годівлі перепелів, курчат-бройлерів, молодняка ВРХ на сухій дробині), які підтвердили доцільність її використання. Ведуться розробки оптимальних режимів сушіння дробини з нашої сировини (ячмінь з несолодованими добавками), зокрема на базі ПАТ «Оболонь» у 2012 р. було визначено раціональний температурний режим, що забезпечує якісне висушування пивної дробини для комбікормів. У співпраці пивоварів та тваринників закладено

величезний потенціал: використання відходів як корму дозволяє зменшити імпорتنі закупівлі шротів, підтримати локальне виробництво кормів і знизити собівартість тваринницької продукції. Наприклад, в одному з господарств Житомирщини перехід на згодовування 5 кг мокрої дробини коровам дав змогу скоротити витрати на комбікорм на 700 грн в розрахунку на корову за місяць – при цьому надої зросли на 10%. Таким чином, досвід України підтверджує світову тенденцію: *відходи пивного виробництва перетворюються з екологічної проблеми на цінний ресурс для сільського господарства.*

Висновок. Включення відходів пивоваріння до раціонів сільськогосподарських тварин має велике значення і багатовекторний позитивний ефект. З економічної точки зору, це дає змогу здешевити виробництво тваринницької продукції за рахунок заміни частини дорогих кормів дешевшими побічними продуктами. Результатом є вища рентабельність молока, м'яса, яєць та іншої продукції. З технологічної сторони, сучасні методи консервації (силосування у траншеях або рукавах, сушіння та гранулювання) дозволяють перетворити швидкопсувні пивні відходи на стабільні корми, придатні до довготривалого зберігання і транспортування. Це розширює географію їх використання і згладжує сезонність (оскільки пиво варять більшою мірою влітку, а корми більше потрібні взимку – завдяки консервуванню дробину, отриману влітку, згодовують узимку). З позиції впливу на тварин, пивні відходи – цінне джерело поживних речовин: вони постачають білок, вітаміни, легкоферментовану клітковину. При правильному балансуванні раціонів це веде до підвищення продуктивності – збільшення надоїв, швидших приростів, кращої відтворної здатності поголів'я. Багато фермерів відзначають і поліпшення стану здоров'я тварин, адже дріжджові компоненти зміцнюють імунітет, а клітковина з дробини нормалізує травлення. Нарешті, з екологічного погляду, така утилізація відходів відповідає принципам сталого розвитку: зменшується навантаження на довкілля, скорочується обсяг відходів, що потребують утилізації, і водночас знижується потреба у вирощуванні додаткових

кормових культур (а отже, економляться вода, добрива, земля). У глобальному вимірі використання побічних продуктів пивоваріння для кормоприготування – це приклад ефективної кругової економіки, коли відходи одного виробництва стають сировиною для іншого. Отже, значення відходів пивного виробництва для годівлі сільськогосподарських тварин важко переоцінити: це і економічна вигода для аграрного сектору, і технологічний крок уперед у виробництві кормів, і внесок у більш екологічно дружнє сільське господарство майбутнього.

1.2. Аналіз існуючих конструкцій технічних засобів для обробки вторинних ресурсів пивоварного виробництва [1]

Як показують попередні дослідження, технічні засоби для зневоднення пивної дробини відзначаються складністю конструкції, високою металоємністю та низькою ефективністю технологічного процесу. Встановлено, що наявні технічні засоби для зневоднення пивної дробини не повністю відповідають зоотехнічним вимогам, які висуваються до пивної дробини як добавки до корму для сільськогосподарських тварин [1].

Методи розділення неоднорідних рідких систем (суспензій) знайшли широке застосування в різних галузях економіки. Проведення детального аналізу існуючих конструкцій машин і апаратів, що використовуються для фракціонування дисперсних середовищ, становить певні труднощі, оскільки в літературних джерелах автори пропонують різні класифікації. Крім того, одні й ті самі установки та апарати часто застосовуються для розділення дисперсних середовищ із різними фізико-механічними властивостями. За принципом дії всі пристрої механічного фракціонування (за винятком флотаційних, які утворюють окрему групу) можна поділити на пристрої фільтрування та пристрої осадження [1].

Фільтрування відбувається під дією різних механічних сил, таких як гравітаційні, інерційні та поверхневі сили тиску [1].

Принцип фільтрування полягає в тому, що тверді частинки суспензії, на які діє рушійна сила під час проходження крізь фільтрувальну перегородку, затримуються на її поверхні, тоді як рідка фракція проходить через пори перегородки [1].

У виробництві найпоширенішими і найбільш ефективними установками для зневоднення є віброфільтри та центрифужні фільтрувальні установки. Їх широке застосування пояснюється простотою конструкції, невеликим енергоспоживанням, компактністю, надійністю в роботі та високою питомою пропускною здатністю фільтрувальної перегородки [1].

Віброфільтри відрізняються компактними розмірами та використовуються на підприємствах агропромислового комплексу для розділення суспензій, визначення фракційного складу та попередньої обробки вторинних продуктів [1].

На рис. 1 зображено схему віброфільтра біохімічного типу, який складається з кількох основних елементів: вібратор із приводом (1); пружинна опора (2); конічне днище зливного бункера (3); нижній приймальний бункер (4); лотки для виведення твердої фракції (5); верхній бункер із фільтрувальною перегородкою (7); камера подачі суспензії (8) [1].

Під час роботи віброфільтра суспензія подається у центр вібруючого сита, де під дією інерційних, масообмінних та гравітаційних сил відбувається розділення компонентів: рідка фаза проходить крізь фільтрувальну перегородку, тоді як тверда фракція накопичується на її поверхні та виводиться через спеціальні лотки [1].

Фільтрат проходить через фільтровану перегородку в нижній бункер і потім відводиться назовні через лоток для подальшої обробки. Тверда фракція, яка утворюється в результаті фільтрації, переміщається до периферії верхнього бункера під дією інерційних сил і потім відводиться на переробку через лотки. Через малу продуктивність фільтрів, низькоефективний процес розділення, високу вологість твердої фракції і невелику експлуатаційну надійність, їх застосування обмежене [1].

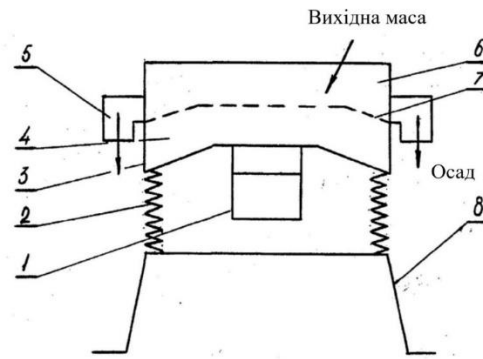


Рис. 1.1. Віброфільтр [1].

У деяких країнах використовується проста установка з активним робочим органом, яка називається «дугове сито» (рис. 2). Вона складається з зварної рами 4, на якій встановлений похилий жолоб 3. Дно жолоба має форму вигнутого сита 1, виконаного з перфорованого металевого листа. Під ситом знаходиться піддон 5 для збору фільтрату. Сировина подається на сито через розподільний лоток 2 і рівномірно розподіляється по всій ширині сита. При стіканні сировини вниз по кривій перфорованої поверхні воно фільтрується. Фільтрат збирається в піддоні і виводиться в збірник, а тверда фракція скочується з нижнього краю сита і транспортується для подальшої обробки. У сучасній крохмалопаточній промисловості використовується кілька типів дугових «кривих» сит [1].

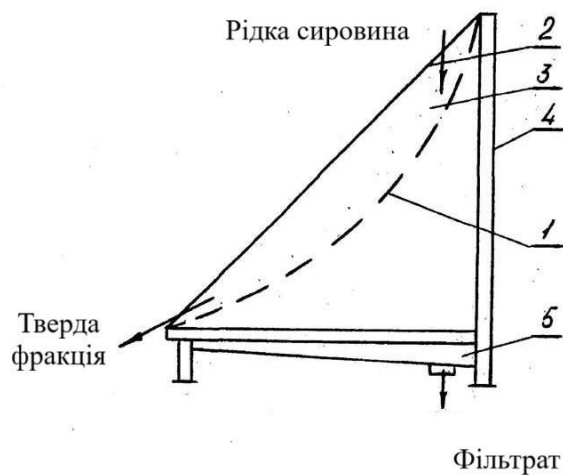


Рис. 1.2. Технологічна схема «дугового» сита. Однак при експлуатації цих установок виникають проблеми, такі як висока вологість твердої фракції, забивання фільтруючого елемента і велика кількість тонкодисперсних частинок у фільтраті [1].

Інерційні грохоти легкого типу ГІЛ-32,42,52 широко використовуються в багатьох галузях. Конструкція грохотів принципово однакова, але ГІЛ-32 відрізняється від ГІЛ-42,52 верхнім розташуванням вібратора. Інерційні грохоти типу ГІЛ неефективні в процесах розділення, оскільки містять багато дрібних зважених частинок у рідкій фракції, високу вологість твердої фракції осаду) і забруднений фільтрат. У процесі роботи продуктивність грохотів типу ГІЛ знижується через поступове забивання комірок фільтрувальної перегородки зваженими частинками [1].

Грохоти (рис. 1.3) складаються з декількох елементів, включаючи короб, розподільний лоток, огорожу дебалансу, фільтрувальні перегородки, проміжну опору, стійку, піддон, пружинну опору, вібратор, клиноремінну передачу, електродвигун, підмоторну раму і раму [1].

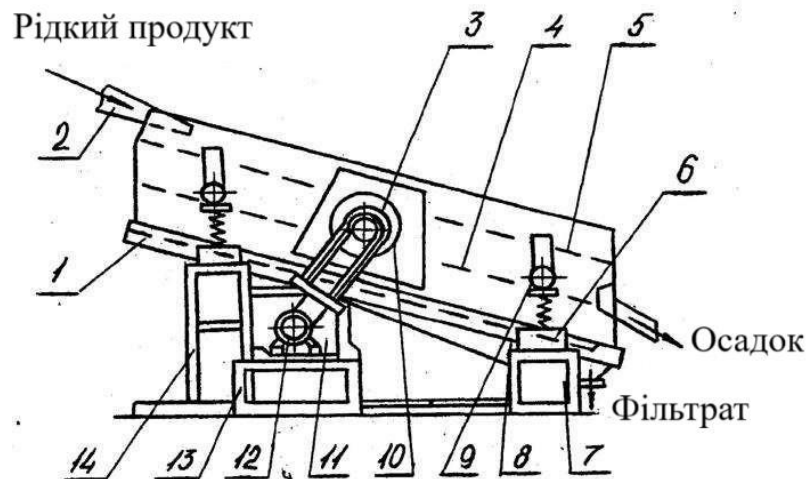


Рис. 1.3. Грохот типу ГІЛ [1].

Сировина подається на верхнє сито через лоток, який забезпечує рівномірний розподіл по ширині фільтрувальної перегородки. Тут грубі механічні включення відокремлюються і направляються в відвал. Очищена суспензія проходить через нижнє сито, де фільтрується. Рідка фракція стікає в піддон, а тверда фракція сходить з сита і направляється на подальшу переробку.

Продуктивність віброгрохотів може становити від 80 до 100 м³/год [1].

Відмінною особливістю барабанного віброгрохота ГБН-100 порівняно з грохотами типу ГІЛ є можливість роботи у двох режимах: без вібрації – при

вологості продукту понад 97,6 %, та з вібрацією – при меншій вологості. Режими роботи й параметри фільтрувальної перегородки істотно впливають на кількісні та якісні показники роботи віброгрохотів. Розроблений в ІМЕСГ віброгрохот ГБН-100 (рис. 4) складається з: фільтрувального барабана (2); сита (3); завантажувального патрубку (4); піддону для збору рідкої фракції (5); лотка для відведення твердої фракції (1). Під час роботи вологий продукт подається через завантажувальний патрубок до обертового барабана. Під дією відцентрових сил матеріал притискається до внутрішньої поверхні барабана й проходить крізь сито, що забезпечує ефективне розділення суміші на тверду та рідку фракції [1].

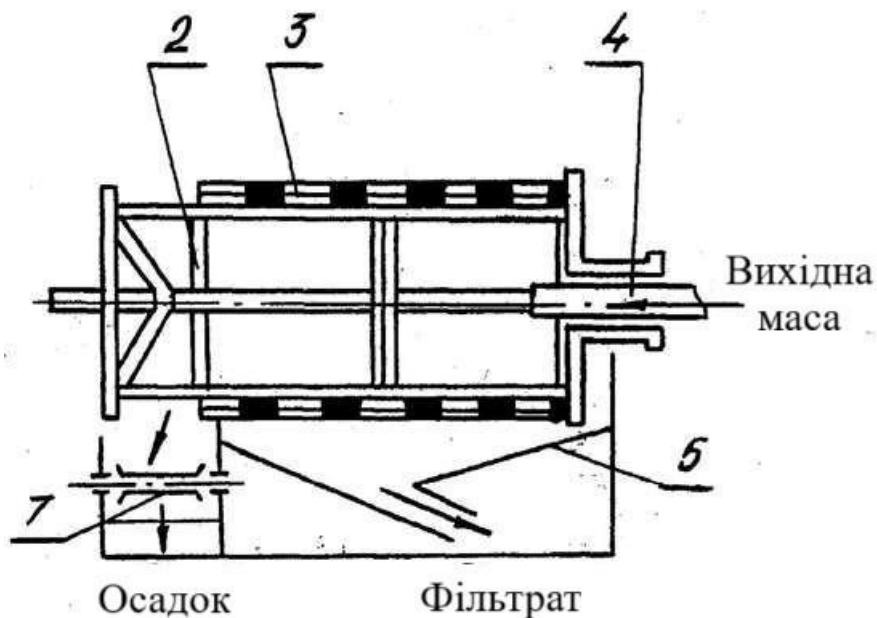


Рис. 1.4. Схема барабанного віброгрохота ГБН-100 [1].

Тверда фракція переміщується в осьовому напрямку завдяки вібрації барабана та виводиться через лоток, тоді як рідка фракція збирається у піддоні та відводиться назовні [1].

Пропускна здатність віброгрохота становить 67,4 м³/год.

Однак віброгрохот ГБН-100 має низку недоліків, серед яких [1]:

- висока вологість отримуваної твердої фракції;
- низька ефективність процесу розділення за зваженими речовинами;

- складність технічного обслуговування та контролю технологічного процесу;
- обмежена адаптація до зміни фізико-механічних властивостей матеріалу, що розділяється.

У зв'язку з цим дана модель не набула широкого поширення [48, 71].

У харчовій промисловості для зневоднення твердої фракції широко застосовуються фільтр-преси. Шнековий фільтр-прес (малюнок 8) складається з подаючого та пресуючого шнеків, перфорованого циліндра, натискного корпусу та електроприводу. Шнеки виготовляються з бронзи й обертаються у протилежних напрямках із різними швидкостями [1]:

- частота обертання подаючого шнека – $7,5 \text{ хв}^{-1}$,
- частота обертання пресуючого шнека – $3,5 \text{ хв}^{-1}$.

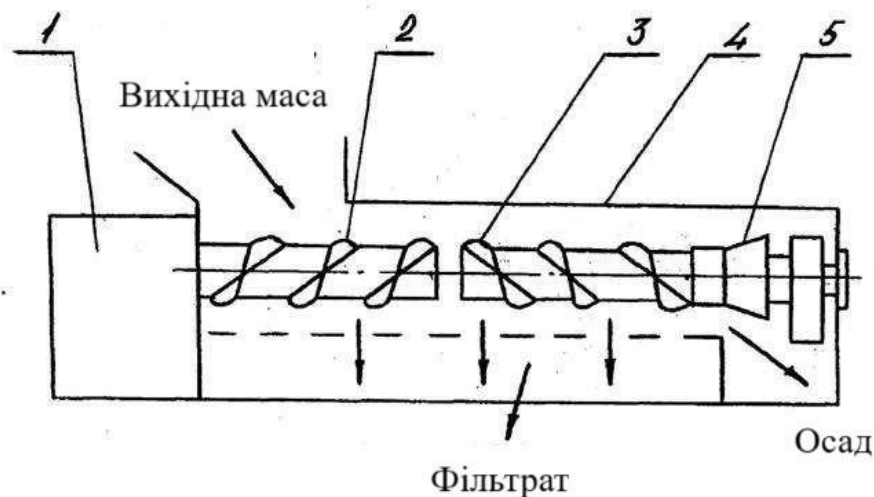


Рис. 1.5. Шнековий фільтр-прес ВПО-20 [1].

Шнеки обертаються всередині перфорованого латунного циліндра, посиленого зовні і з боку пресуючої частини сталевими кільцями. Тверду фракцію, що надходить в завантажувальний бункер, подаючий шнек переміщує вздовж циліндра, а рідина, що виділяється, стікає в піддон через отвори в циліндрі. При сходженні маси з останнього витка подаючого шнека вона підхоплюється першим витком обертового назустріч пресуючого шнека і просувається далі вздовж циліндра. Потім маса стискається, і з неї виділяється основна рідина. Однак, шнековий фільтр-прес обробляє вихідну масу зниженої

вологості під високим тиском, що призводить до значному забрудненню фільтрату. Крім того, привід пристрою ускладнений, енергоємний і має велику металоємність [1].

Для осадження зважених частинок у суспензіях використовують вертикальні, горизонтальні та радіальні відстійники, де осадження відбувається під дією сили тяжіння. Серед них найпростішим і широко використовуваним у тваринництві є вертикальний відстійник (рис. 1.6). У цій установці оброблювану суспензію подають зверху в центральну трубу 3. При виході з нижньої частини труби через розтруб 6 маса змінює напрямок руху і піднімається вгору. В результаті зважені частинки випадають в осад під дією сили тяжіння, а освітлена рідина через верхній зріз відстійної частини 5 переливається в зливний лоток 4 і відводиться для подальшої обробки [1].

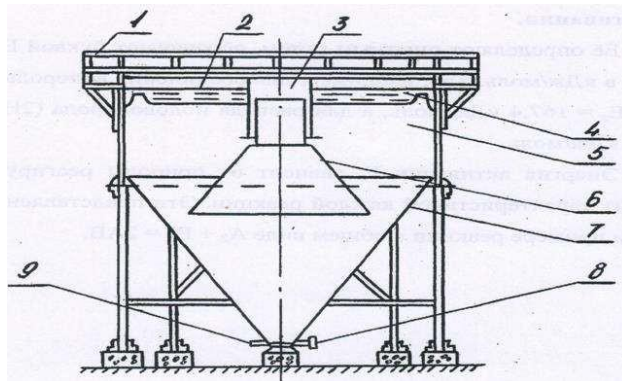


Рис. 1.6. Вертикальний відстійник. Осад накопичується в муловій частині 7 і через кожні 3-4 години випускається в проміжну ємність через патрубок 9 для подальшого машинного фракціонування [1].

Патрубок 8 служить для зворотного промивання мулової частини відстійника в разі ущільнення осаду. Установка також має складальний лоток 2 і майданчик з огорожею 1. Отриманий осад у вертикальних, горизонтальних і радіальних відстійниках має вологість, яка перевищує допустиму норму. Для зниження вологості осаду доводиться використовувати громіздкі мулові майданчики, що може призвести до забруднення навколишнього середовища [1].

У крохмалепаточній промисловості широко застосовуються центрифуги типу ЦЛС-100, ЦЛСК-200 (відцентрово-лопатеві сита), які за своєю

конструкцією нагадують відцентровий насос. Фільтруючі центрифуги використовують відцентровий метод для розділення суспензій, їх відмінною особливістю є наявність перфорованого ротора [1].

Описувані центрифуги застосовуються для розділення крохмального молока від картопляної каші. Основним елементом таких центрифуг є лопатевий ротор (рис. 1.7). Ця конструкція являє собою два диски 1, між якими закріплені фільтруючі лопатки 2, які спираються опуклою стороною на збірники фугату 3. З увігнутої сторони лопатки притискаються ексцентриками 4 [1].

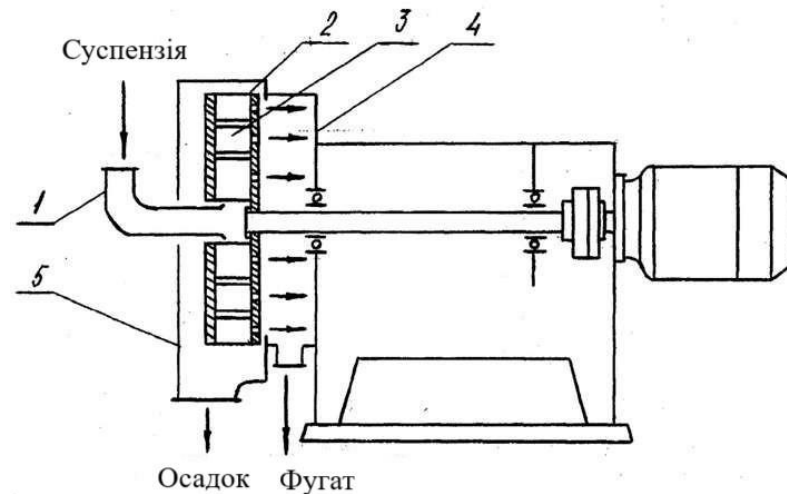


Рис. 1.7. Центрифуга ЦЛС-100 [1].

Суспензія, яку потрібно центрифугувати, надходить через підвід 1, розташований у центральній частині ротора 2. Потім вона потрапляє на фільтруючі лопатки 3 [1].

Рідка фаза разом із частинками крохмалю проходить через сітчасту поверхню лопаток у збірники, а потім через випускні вікна викидається в приймач фугату 4 [1].

Грубодисперсна тверда фаза (мезга), утримувана сітчастою поверхнею, під дією відцентрових сил інерції викидається в кожух 5 . Однак, ці апарати мають недоліки, такі як висока енергоємність, металоємність і низький рівень вологовідділення, який становить всього до 88-90% [1].

Фільтруючі центрифуги з ножовим вивантаженням твердої фракції і зі шнековим вивантаженням осаду отримали широке поширення в сільському

господарстві. Конструкція ВНІМЖ і центрифуги зі шнековим вивантаженням осаду є найбільш поширеними [1].

Центрифуга конструкції ВНДІМЖ (рис. 1.8) складається з фільтруючого ротора 4, сита 5, лопатки 6, ножа 3, шнека 1, корпусу 2 і електроприводу 7. У процесі роботи центрифуги суспензія надходить через живильник на фільтрувальну поверхню обертового ротора і рухається до нерухомого ножа. Рідка фракція під дією відцентрової сили і вакууму, що створюється лопатками всередині кожуха, проходить через отвори сита і викидається з кожуха тими ж лопатками [1].

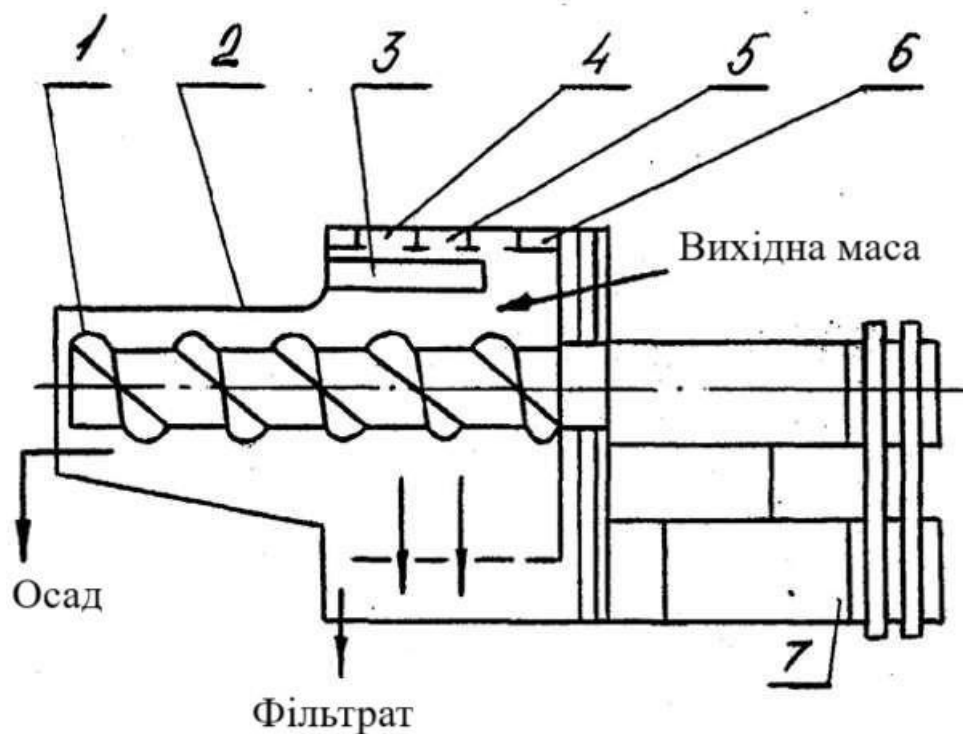


Рис. 1.8. Центрифуга конструкції ВНІМЖ [1].

Шнек знімає тверду фракцію, що залишилася на сітці, і додатково зневоднює її пресуванням в перфорованому корпусі. Потім тверда фракція виводиться з центрифуги шнеком для подальшої обробки [1].

За технічними характеристиками пропускна здатність центрифуги становить 40- 80 м³/год, а ефект розділення досить високий. Однак досвід експлуатації фільтрувальних центрифуг ВНІМЖ показує, що вони не можуть

достатньо знизити вологість отриманого осаду, тому потрібне додаткове зневоднення [1].

Робота установок характеризується забиванням пор фільтрувальної перегородки, швидким зносом ножа зняття осаду і фільтрувальної перегородки. Крім того, вони енергоємні, процес розділення неефективний, а фільтрат сильно забруднений [1].

Французький Національний випробувально-дослідний центр з впровадження сільськогосподарського машинного обладнання запропонував використовувати нескінченний гравітаційний автоматизований фільтр під назвою «Сафіте» (рис. 9). На установці фільтруюча стрічка 1 пропускає вологу масу, яка просувається між віджимними валиками 3. Рідка фракція проходить через стрічку і зливається в ємність 2. Тверда фракція, віджата валиками, проходить через них і обсипається під апаратом, де її можна зберігати або використовувати [1].

Продуктивність стрічкового фільтра «Сафіте» невисока і становить 4-6 м³/год, при цьому вона залежить від вологості вихідного матеріалу [1].

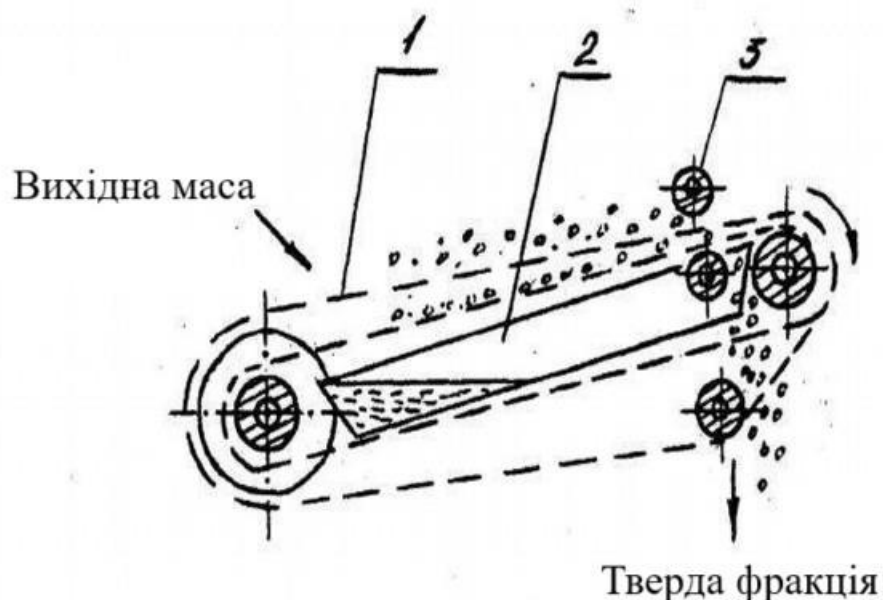


Рис. 1.9. Схема гравітаційного фільтра «Сафіте» [1].

У Польщі для розділення суспензій на тверду і рідку фракції використовують фільтр-сепаратор «Бауер», який застосовується в целюлозній,

хімічній і пивоварній промисловості. Він відрізняється простою конструкцією, відсутністю рухомих елементів і низькою вартістю. Продуктивність фільтра-сепаратора становить 30-40 м³/год, але недоліком є висока вологість відокремленої твердої фракції [1].

Висновки по розділу

Після аналізу наявних установок і апаратів для механічного фракціонування вологих мас було виявлено, що фільтрувальні установки мають перевагу перед іншими типами. Розділення суспензій шляхом примусового фільтрування через пористу перегородку, здатну затримувати зважені частинки і пропускати рідину, широко застосовувалося в технологічних лініях багатьох галузей промисловості. Робота установок для розділення вологого матеріалу на рідку і тверду фракції характеризується продуктивністю (швидкістю фільтрування), ефектом освітлення суспензії і вологістю твердої фази (осаду). Як відомо, при вологості сировини вище 65 % видаляти воду випаровувальним методом в більшості випадків нерентабельно. Тому при високій вологості пивної дробини технологічна схема утилізації повинна починатися з операції зневоднення. Найпростішими за конструкцією і дешевими апаратами, що використовують дію відцентрової сили є гідроциклони.

РОЗДІЛ 2

ОПИС КОНСТРУКЦІЇ ГІДРОЦИКЛОНА-ЗГУЩУВАЧА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Опис запропонованого гідроциклону-згущувача для зневоднення пивної дробини

Гідроциклон-згущувач (рис. 1) складається з циліндричного корпусу 1, розвантажувального патрубку 3, живильника 2, зливного патрубку 4. У нижній частині розвантажувального патрубку 3 закріплено пристрій 11 для зневоднення згущеної фракції, який містить верхню частину порожнистого корпусу 5 та нижню частину порожнистого корпусу 9, виконану у формі зрізаного конуса, спрямованого меншим основою донизу, і патрубок 10 для відведення твердої фракції [2].

У нижній частині порожнистого корпусу 5, співвісно з розвантажувальним патрубком 3, встановлено фільтрувальний елемент 6, який являє собою конічну перфоровану поверхню, з'єднану основою з коробом 7, пропущеним із ущільненням крізь конічну частину порожнистого корпусу 9. У нижній частині короба 7 розташовано патрубок 8 для виведення фільтрату [2].

Гідроциклон-згущувач працює таким чином: пивне сусло під тиском через живильник 2 надходить усередину циліндроконічного корпусу 1, де відбувається його розділення на рідку та густу фракції. Відокремлена рідка фракція (пивне сусло) відводиться через зливний патрубок 4, а згущена (пивна дробина) – по конічній частині корпусу 1 надходить у розвантажувальний патрубок 3 [2].

Згущена у гідроциклоні фракція подається на фільтрувальний елемент 6, де зневоднюється через перфоровані отвори внаслідок гравітаційної фільтрації. Зневоднена тверда фракція (пивна дробина), переміщуючись по похилій поверхні фільтрувального елемента 6 під дією різниці сил тертя та гравітації, сповзає з

нього та виводиться з гідроциклона-згущувача, ковзаючи по нижній частині корпусу 9 через патрубок 10 для видалення твердої фракції [2].

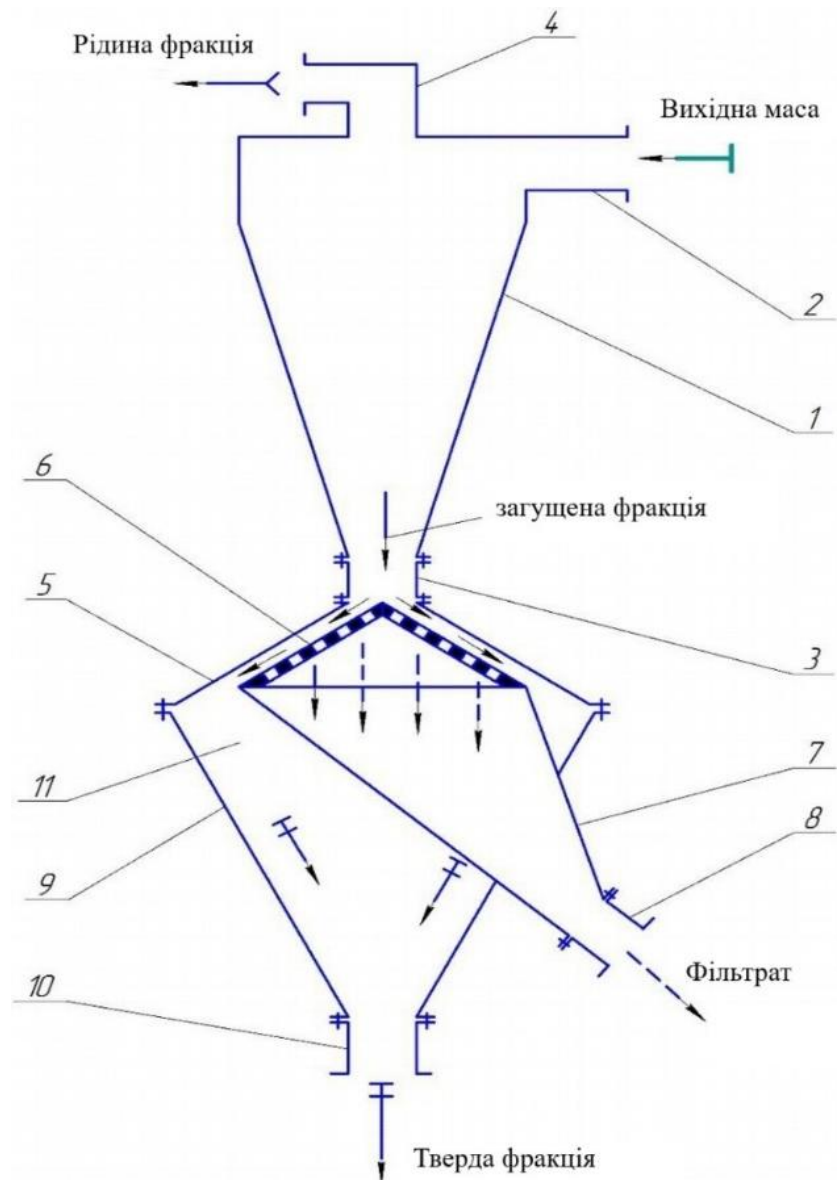


Рис. 2.1. Гідроциклон-згущувач [2]

Пивне сусло, відфільтроване від пивної дробини, проходячи у вигляді фільтрату через перфоровану поверхню фільтрувального елемента 6 по коробу 7, зливається через патрубок 8 для виведення фільтрату, об'єднується з пивним суслом, відведеним через зливний патрубок 4, і подається до сусловарильного котла [2].

Для удосконалення установок типу гідроциклона необхідні дослідження гідродинаміки цих апаратів. Описати гідродинамічну обстановку в них можна шляхом розроблення математичної моделі структури потоків.

Під час обробки солодової дробини в напірному гідроциклоні в ньому формуються три зони (рис. 2.2), які відрізняються структурою потоків, виконуваними функціями та структурним станом внутрішньої фази емульсії: 1 – пристінна зона; 2 – проміжна зона зі складним циркуляційним течієм; 3 – ядро [7].

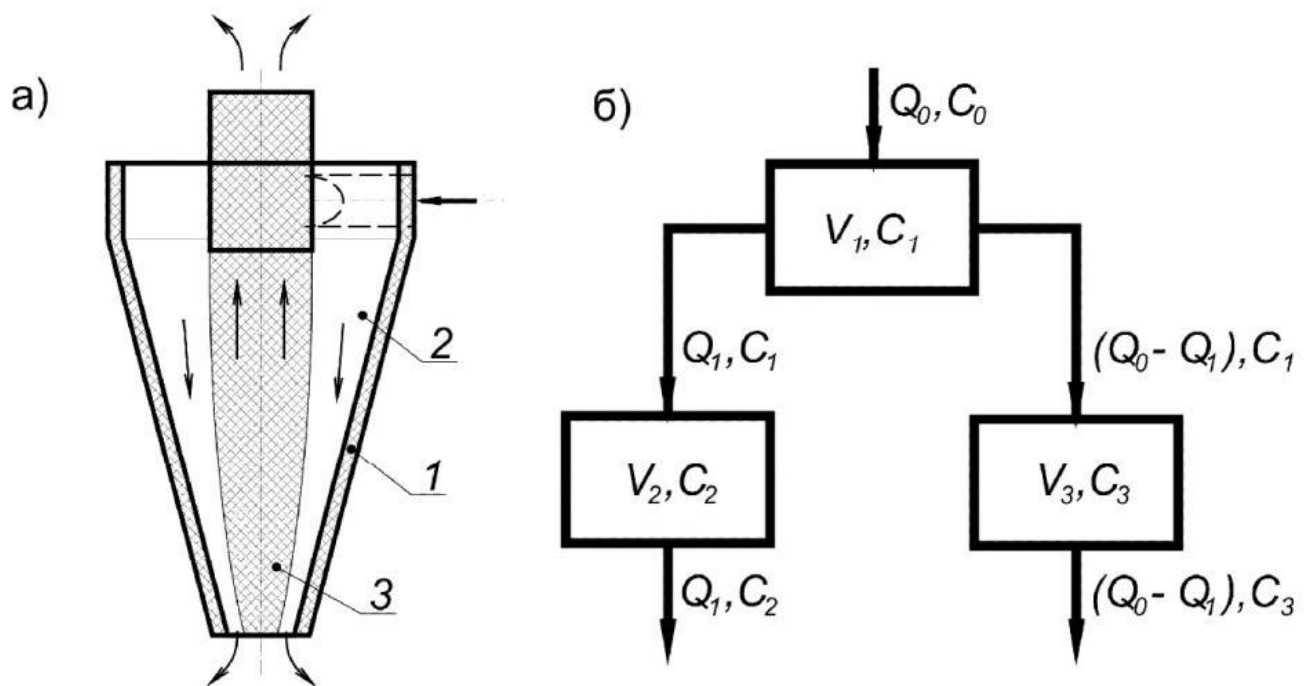


Рис. 2.2. Комбінована модель гідроциклона

Для описання процесу коалесценції частинок суспензії в гідроциклони скористаємося теорією турбулентності Колмогорова–Обухова. Теоретична модель зіткнення крапель у турбулентному потоці розглядається цією теорією з урахуванням таких припущень [7]:

- має місце повне захоплення крапель суспензії турбулентними пульсаціями того масштабу, який відіграє основну роль у механізмі зіткнення крапель;

– навколо кожної краплі існує сферична поверхня $R_c = 1,5dK$, при потраплянні в яку будь-яка інша крапля зіткнеться та зіллється з виділеною краплею;

– радіус сфери R_c є дуже малим порівняно з масштабом турбулентності l .

За наявності поглинальної сфери, концентрація крапель на поверхні якої дорівнює нулю, поблизу неї виникає градієнт концентрації крапель і відповідний йому дифузійний потік, що дорівнює середній кількості крапель n , які перетинають цю поверхню внаслідок турбулентного руху.

2.2. Методика проведення досліджень

Для визначення раціональних параметрів гідроциклона-згущувача слід враховувати низку фізико-механічних характеристик пивної дробини – зокрема вологість, густину, в'язкість і гранулометричний склад, оскільки саме вони істотно впливають на ефективність процесу розділення.

Більшість показників, що визначають фізико-механічні властивості солодової дробини, залежать від її вологовмісту. Саме вологість є ключовим параметром під час розрахунку основних конструктивних характеристик гідроциклона-згущувача. Для встановлення вологості солодової дробини застосовували метод висушування з попереднім підсушуванням. Масу матеріалу ретельно перемішували та розміщували у бюксі, де здійснювали висушування. Навішування поміщали в сушильну шафу СЕШ-3М (рис. 2.3) і підсушували за температури 100–105 °С упродовж 1–2 годин залежно від початкового рівня вологості матеріалу.



Рис. 2.3. Лабораторне обладнання для визначення відносної вологості

Після підсушування чашку з навішуванням охолоджують у ексикаторі, після чого зважують із точністю до 0,01 г та подрібнюють увесь зразок. Для остаточного висушування обирають метод, що відповідає меті аналізу, наприклад прискорене висушування або висушування до сталої маси.

Різницю в масі дробини визначають на електронних вагах марки ВЕД-102-0,01 з точністю до 0,01 г. Отримана різниця мас до і після висушування відображає вміст води у навішуванні. Обчислення значень вологості здійснюють за формулою:

Вологість солодової дробини істотно впливає на її в'язкість, яка визначається силами взаємодії між частинками дробини. Для вимірювання кінематичної в'язкості рідкої солодової дробини застосовують капілярні віскозиметри, такі як ВПЖ-1, БПЖ-2 та віскозиметр Пінкевича. Залежно від прозорості рідини та діапазону температур обирають відповідний тип віскозиметра. У цьому дослідженні використовували віскозиметр ВПЖ-2. Визначення кінематичної в'язкості в капілярних віскозиметрах ґрунтується на тому, що в'язкість рідин пропорційна часу, який необхідний для проходження однакового об'єму рідини через капіляр, що забезпечує ламінарний режим течії.

Густина солодової дробини є одним із ключових факторів, що впливають на процес дегідратації. Для дослідження густини дробини виконували такі дії: відбирали навішування солодової дробини масою приблизно 20–25 г із вихідної проби та поміщали його в бюксу, після чого зважували бюксу на електронних вагах із точністю до 0,01 г.

На рис. 2.4 наведено залежність між в'язкістю солодової пивної дробини та рівнем її вологості.

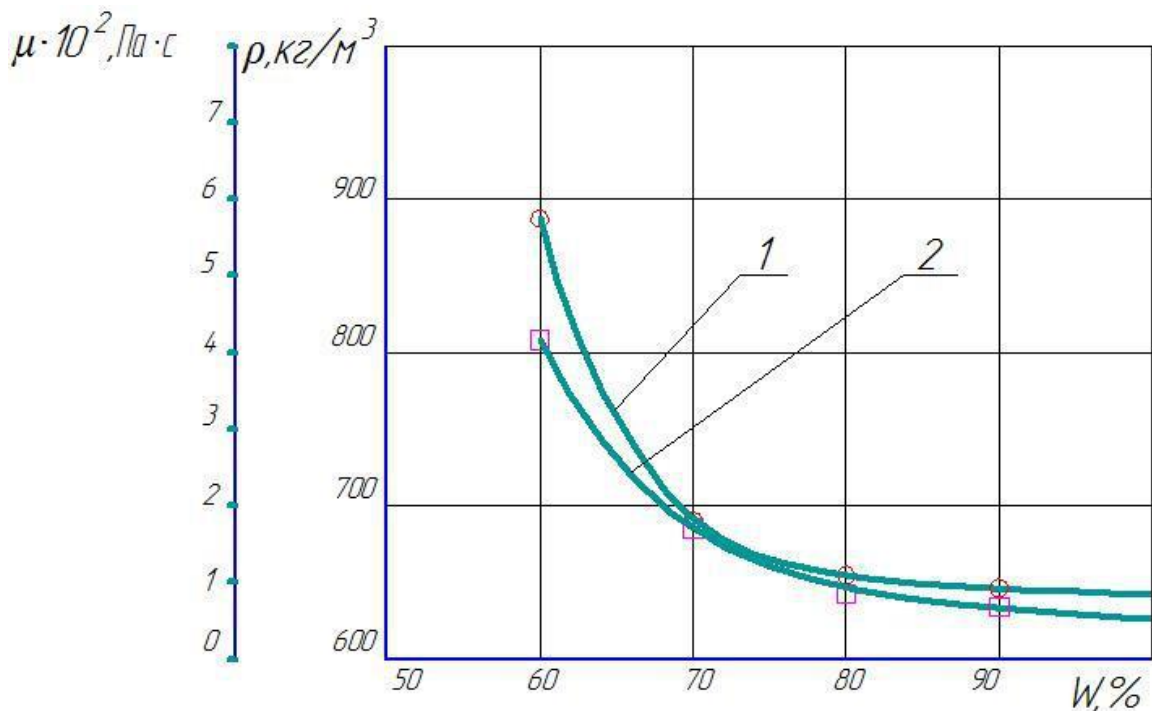


Рис. 2.4. Графік залежності в'язкості та густини пивної дробини від її вологості: 1 – в'язкість μ , 2 – густина ρ .

Варто зауважити, що зі зростанням вологості солодової дробини її густина зменшується.

Одним із основних чинників, що впливають на рух суспензії солодової дробини в гідроциклоні-згущувачі, є тертя. Для визначення коефіцієнта тертя виконували такі дії: на фільтраційну поверхню (щілинне сито $4 \times 0,25$) із металевим днищем, що запобігає втраті води (рис. 2.5), поміщали 100 г солодової дробини. Далі змінювали кут нахилу фільтраційної поверхні відносно горизонту та визначали кут, за якого починається рух солодової дробини,

використовуючи транспортер, установлений у центрі обертання поверхні. Визначений кут є кутом відриву (φ_o) матеріалу від фільтраційної поверхні.

Потім зменшували кут нахилу до значення, за якого рух матеріалу припиняється, і знову визначали цей кут за допомогою транспортера. Отриманий кут є кутом зупинки (φ_s) солодової дробини на ситі. Зміна кута нахилу фільтраційної поверхні дозволила обчислити середнє значення між кутами відриву та зупинки з точністю до 3° , яке і є кутом ковзання (φ) солодової дробини по щілинному сити.

Необхідність визначення кута ковзання таким способом пояснюється тим, що солодова дробина має властивість застрягати у щілинах сита, що спричиняє додатковий опір руху осаду та ускладнює точне визначення фактичного кута ковзання. Для визначення кута ковзання були проведені експерименти зі зміною вологості солодової дробини (рис. 2.6) у діапазоні від 90 % до 60 % із п'ятикратним повторенням кожного досліджу.

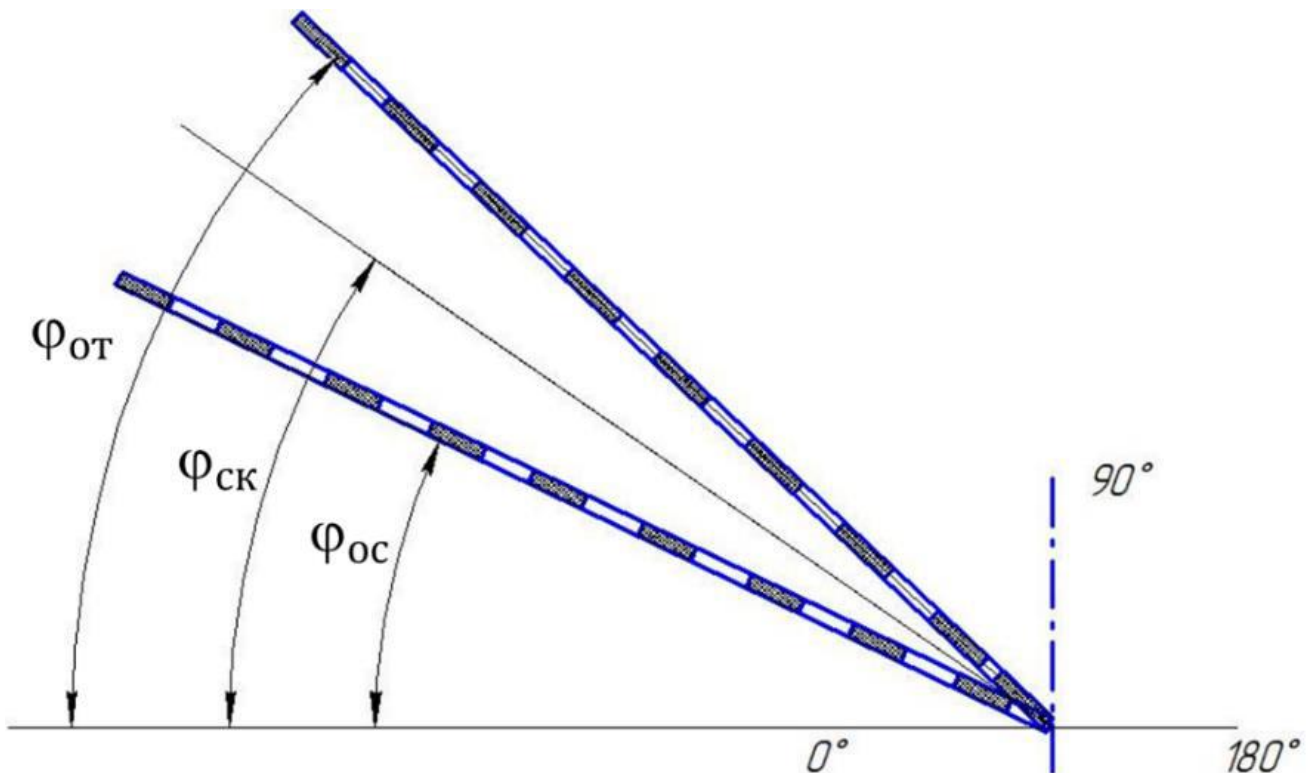


Рис. 2.5 Визначення кута тертя ковзання пивної дробини по фільтраційній поверхні: φ_u – кут установлення; φ_s – кут ковзання; φ_o – кут відриву.

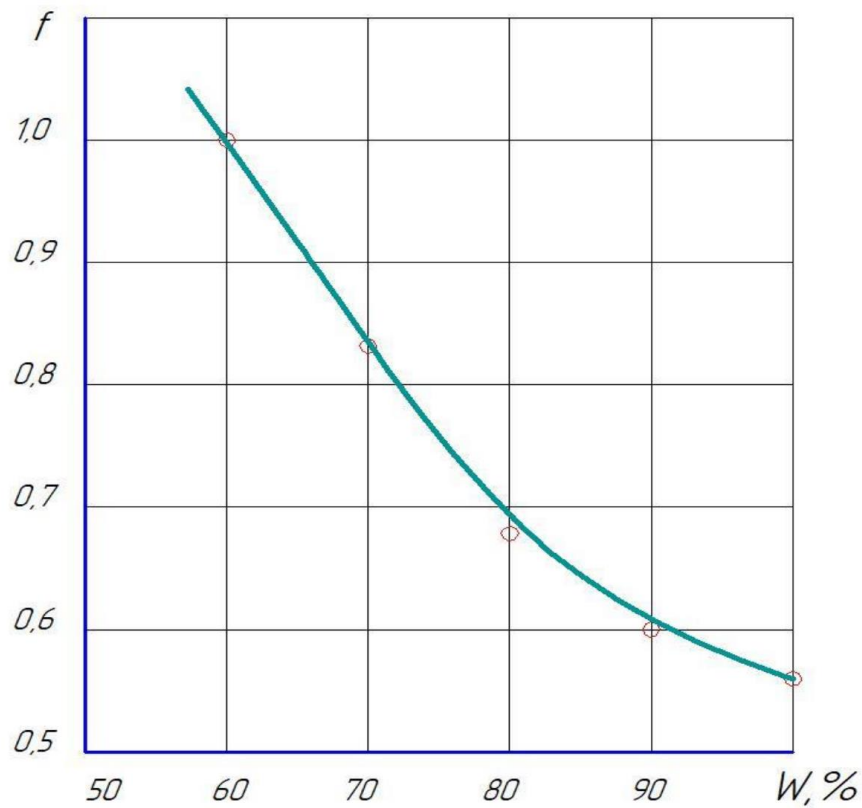


Рис. 2.6. Графік залежності коефіцієнта тертя f від вологості W пивної дробини.

Отримані середні значення тангенсів кутів ковзання дали змогу визначити коефіцієнти тертя ковзання солодової дробини по щілинному сити залежно від зміни її вологості. Результати наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати визначення кутів φ_{oc} , φ_{ck} , φ_{ot} .

$W, \%$	90	80	70	60
φ_{oc} , град	34,4	37,5	45,1	48,9
	35,7	38,3	44,1	47,7
	35,6	38,8	44,4	48,8
	34,8	37,7	44,2	48,6
	34,9	37,9	44,6	48,5
φ_{ck} , град	26,9	30,3	35,1	41,9
	26,4	31,1	33,5	41,9
	25,7	29,8	34,5	41,4
	28,8	29,3	33,8	41,5
	27,2	28,3	34,8	41,6
φ_{ot} , Г рад	30,6	33,9	40,1	45,3
	31,1	34,7	38,8	44,8
	30,6	34,3	39,5	45,1
	31,8	33,5	39,1	45,1
	31,1	33,1	39,8	45,1

У лабораторії Поліського національного університету створено дослідну установку (рис. 2.7–2.17) з метою експериментального вивчення процесу розділення пивного затору на тверду та рідку фракції. Під час розроблення установки були враховані такі вимоги: забезпечення стабільності режимів роботи, можливість підтримання параметрів, що впливають на процес розділення, а також регулювання конструкційних і технологічних характеристик у широкому діапазоні. Крім того, пристрій мав бути простим в експлуатації та обслуговуванні.

Перфорована конічна поверхня з листової сталі завтовшки 1,0...1,5 мм, розташована всередині згущувача співвісно з вертикальною віссю гідроциклону, є основним робочим органом установки. Розміри перфорації цієї поверхні становлять $4 \times 2,5$ мм.



Рис. 2.7. Гідроциклон.



Рис. 2.8. Підвідний патрубок гідроциклону



2.9. Вивідний патрубок рідкої фракції.



2.10. Конусна частина гідроциклону.



Рис. 2.11. Циліндрична частина гідроциклону.



Рис. 2.12. Згущувач (загальний вигляд)



Рис. 2.13. Фільтраційна частина згущувача



Рис. 2.14. Нижня частина згущувача з патрубком для відведення рідкої фракції.



Рис. 2.15. Згущувач із патрубком для вивантаження твердої фракції

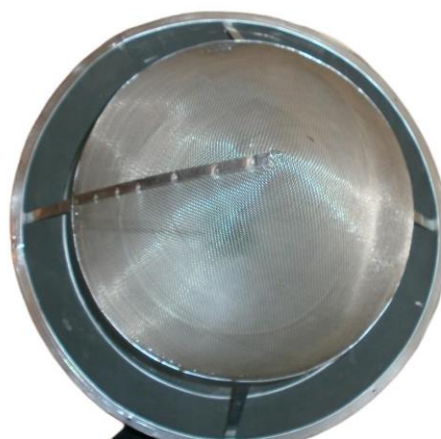


Рис. 2.16. Фільтраційна частина згущувача (вигляд зверху)



Рис. 2.17. Згущувач (вигляд зверху)

Розділення рідкої солодової дробини на фракції відбувається завдяки дії відцентрової сили осадження в гідроциклоні та фільтруванню під дією гравітаційних сил на перфорованій конічній поверхні згущувача.

Для перевірки теоретичних залежностей, а також для визначення кількісних, якісних та енергетичних показників процесу розділення рідкої пивної дробини на фракції було проведено експериментальні дослідження розробленої конструкції гідроциклона-згущувача. Як критерій оптимізації під час проведення експериментальних досліджень було обрано вологість отриманого осаду, оскільки саме вона є найважливішим показником. Одночасно фіксувалася продуктивність установки.

Для визначення найбільш ефективних конструктивних і технологічних параметрів гідроциклона-згущувача було заплановано використання теорії багатофакторного планування експериментів у межах програми досліджень. У виробничих умовах проведено дослідження впливу параметрів гідроциклона-згущувача на вологість твердої фракції пивної дробини з використанням експериментального гідроциклона-згущувача. На основі результатів попередніх досліджень конструктивних і технологічних параметрів гідроциклона-згущувача були виявлені найбільш значущі фактори, що впливають на вологість твердої фракції пивної дробини.

Виходячи з цього, як змінні було прийнято такі фактори:

- кут нахилу фільтраційної поверхні α ;
- довжина фільтраційної поверхні L ;
- продуктивність гідроциклона-згущувача Q .

Для проведення серій дослідів був використаний симетричний некомпозиційний квазі-D-оптимальний план Песочинського. Як критерій оптимізації обрано вологість твердої фракції пивної дробини.

Для перевірки адекватності моделі процесу був використаний F-критерій Фішера. Значення $F_{\text{табл}}$ було вибрано з таблиці відповідних значень для певної кількості ступенів вільності та рівня значущості $q = 95\%$. Якщо розрахункове

значення критерію F було меншим за $F_{\text{табл}}$, то гіпотезу про адекватність моделі приймали. Це означало, що отриманий аналітичний вираз досить точно описував вплив обраних факторів на параметр оптимізації.

Для створення математичної моделі у натуральних змінних необхідно застосувати формули кодування. Після підстановки натуральних значень факторів в отримане рівняння одержували рівняння регресії у розкодованому вигляді. На основі цього рівняння можна будувати поверхні відгуку, які дають змогу оцінити вплив факторів на вологість твердої фракції пивної дробини. У подальшому за характером цих поверхонь можна вибрати оптимальні конструктивні та технологічні параметри гідроциклона-згущувача.

Висновки по розділу

Для проведення експериментального дослідження процесу розділення пивного затору на тверду та рідку фракції в лабораторії Поліського національного університету була створена дослідна установка. Метою експерименту було перевірити теоретичні залежності та визначити кількісні, якісні й енергетичні показники процесу розділення рідкої пивної дробини на фракції. Як критерій оптимізації було обрано вологість отриманого осаду, яка є найбільш важливим показником. Паралельно фіксувалася продуктивність установки.

Для визначення раціональних конструктивних і технологічних параметрів гідроциклона-згущувача застосовували теорію багатофакторного планування експериментів. Для побудови математичної моделі в натуральних змінних використовували формули кодування. Після підстановки натуральних значень факторів до рівняння отримували рівняння регресії у розкодованому вигляді. За характером поверхонь відгуку оцінювали вплив факторів на вологість твердої фракції пивної дробини та обирали раціональні конструктивні й технологічні параметри гідроциклона-згущувача.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ТА АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Результати лабораторних досліджень щодо визначення фізико-механічних властивостей рідкої солодової дробини

У теорії дегідратації важливою задачею є наукове обґрунтування методів проектування та розрахунку обладнання, яке враховує властивості об'єкта та закономірності кінетики процесу. Солодова дробина утворюється в результаті фільтрування пивного затору, що являє собою суміш подрібненого солоду та несоложених зернопродуктів із водою, яка попередньо пройшла процес нагрівання. Після відокремлення рідкої фази (пивного сусла) утворюється осад – власне солодова дробина. Солодова дробина є системою з полідисперсним складом, що містить частинки різного розміру, такі як оболонки зерна, неоцукрений крохмаль та інші нерозчинні компоненти ендосперму. Крім того, у шарі солодової дробини можуть затримуватися речовини, які коагулювали під час затирання: зокрема білок, що осідає в результаті нагрівання затору, а також продукти взаємодії білкових сполук із дубильними речовинами. До важливих фізичних властивостей солодової дробини належать транспортабельність, здатність до злежування та зберігання. Дослідження її фізико-механічних характеристик має велике значення, оскільки дає змогу правильно вибрати інтенсивність режиму роботи та раціонально спроєктувати конфігурацію й функціональні елементи гідроциклонного апарата. Отже, знання цих властивостей є ключовим для досягнення оптимальних результатів дегідратації.

Згідно з графіком на рис. 4.1 можна помітити, що питома вага дробини зменшується зі зростанням її вологості. Це відбувається внаслідок збільшення вмісту води, що призводить до зниження кількості абсолютно сухої речовини з питоною вагою 1250 кг/м^3 і, у підсумку, до загального зменшення питомої ваги дробини до 998 кг/м^3 . За значень вологості від 0 до 12 % крива питомої ваги має

більш крутий характер, що вказує на різкіше зниження питомої ваги. Це пояснюється не лише кількісними змінами у вмісті води, а й якісним станом самої води. У цьому діапазоні вологість представлена водою, яка утримується адсорбційними силами, що стискають її під дуже високими тисками. Це змінює фізичні властивості води, роблячи їх відмінними від її звичайних характеристик.

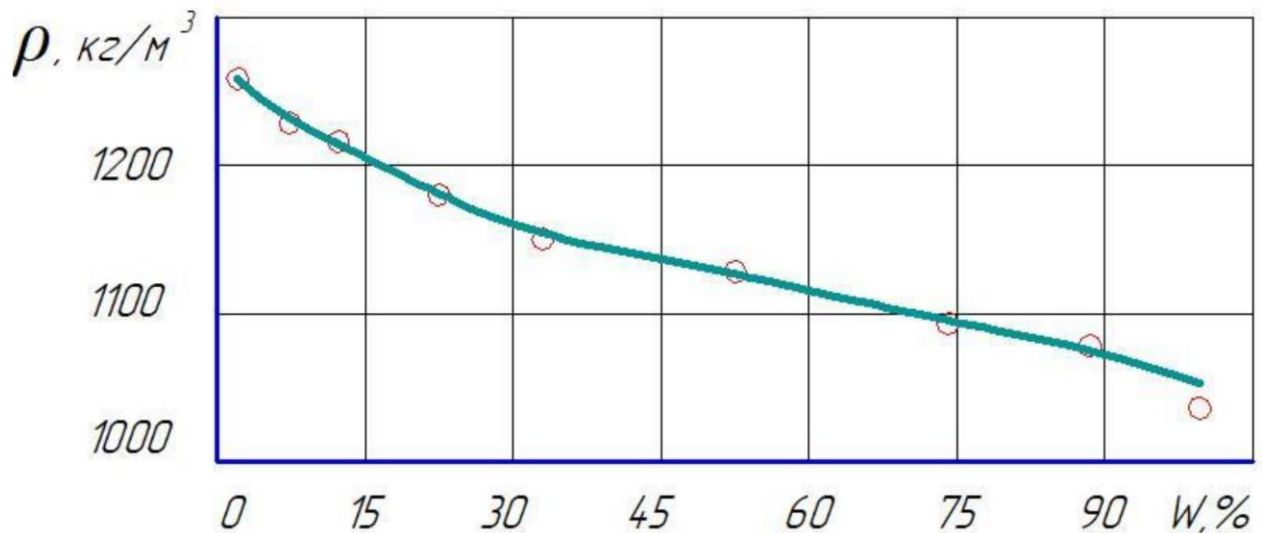


Рис. 3.1. Графік кореляції питомої ваги дробини від вологості

Насипна густина солодової дробини – це маса, що займає одиницю об'єму. Вона залежить від густини та вологості окремих частинок, їхньої форми та шорсткості, а також від способу заповнення об'єму та часу перебування матеріалу в ньому. Визначення насипної густини є необхідним для розрахунку продуктивності машин, транспортних елементів, ємностей та інших об'єктів. Для вимірювання насипної густини використовували масу частинки, на яку діє сила гравітації.

Проведені вимірювання у стані вільної засипки дали змогу отримати мінімальну насипну густину. Результати експериментів із солодовою дробиною наведено на рис. 3.2.

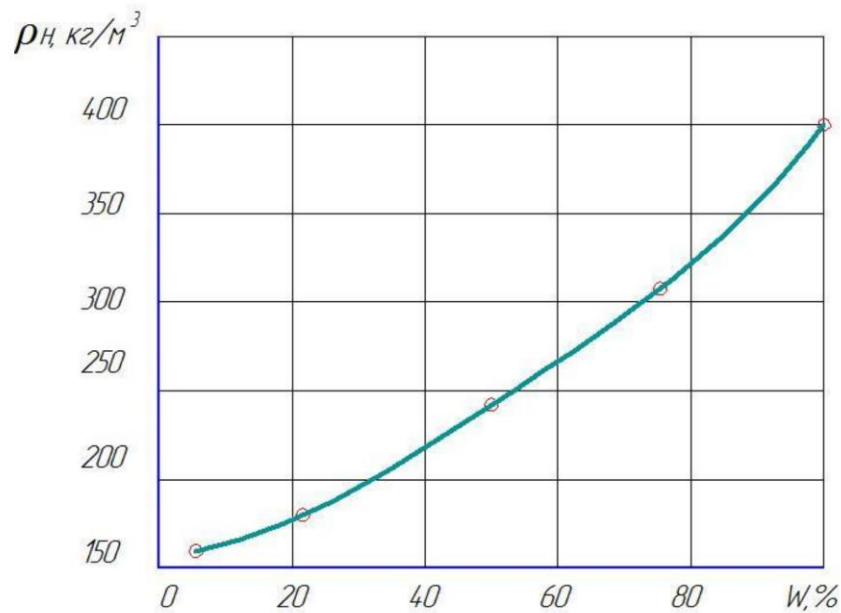


Рис. 3.2. Графік кореляції насипної густини (ρ_n) солодової дробини від вологості (W)

З графіка видно, що зі збільшенням вологості від 0 до 100 % насипна густина зростає, що пояснюється підвищенням коефіцієнта внутрішнього тертя. Насипна густина досліджуваного матеріалу змінювалася в межах від 156,8 до 418 кг/м³.

На основі щільності укладання частинок у шарі визначається насипна густина сипких матеріалів, зокрема й солодової дробини. Коефіцієнт щільності укладання відіграє важливу роль у цьому процесі.

На рис. 3.3 зображено залежність між коефіцієнтом щільності укладання (K) та вологістю солодової дробини (W).

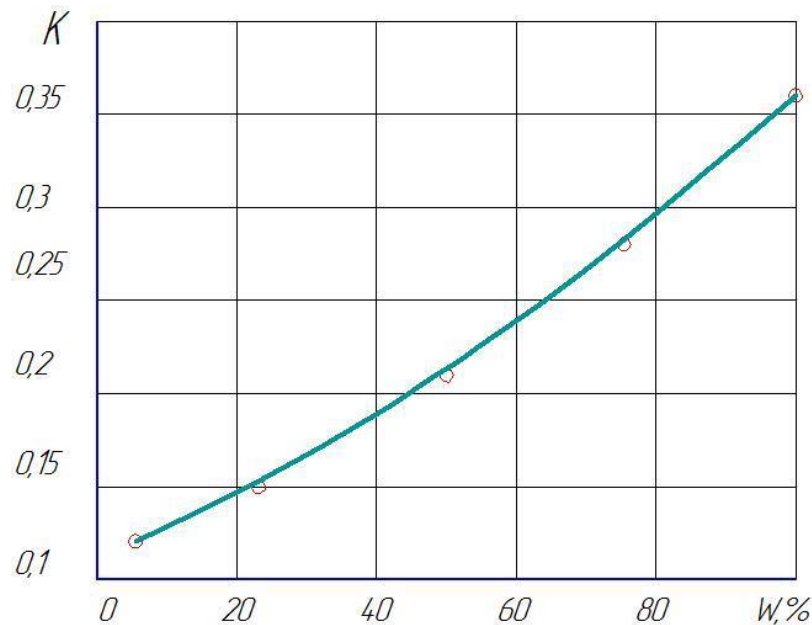


Рис. 3.3. Графік кореляції коефіцієнта щільності укладання солодової дробини від вологості.

З графіка видно, що зі збільшенням вологості солодової дробини від 0 до 100 % коефіцієнт щільності укладання також зростає.

Аналіз отриманих даних свідчить, що на щільність укладання впливають коефіцієнт внутрішнього тертя, форма частинок та їх гранулометричний склад. Крім того, спосіб завантаження солодової дробини й коефіцієнт зовнішнього тертя також відіграють важливу роль. Під дією статичних і динамічних навантажень на апарат, що містить солодову дробину, маса всередині нього ущільнюється.

Кут природного укосу є мірою сипкості частинок солодової дробини й визначається як найбільший кут, який може утворювати вільна поверхня сипкого матеріалу з горизонтальною площиною. Для ідеально сипких матеріалів цей кут дорівнює куту внутрішнього тертя, а для зв'язаних матеріалів – є більшим. На кут природного укосу також впливає вологість, що показано на рисунку 50.

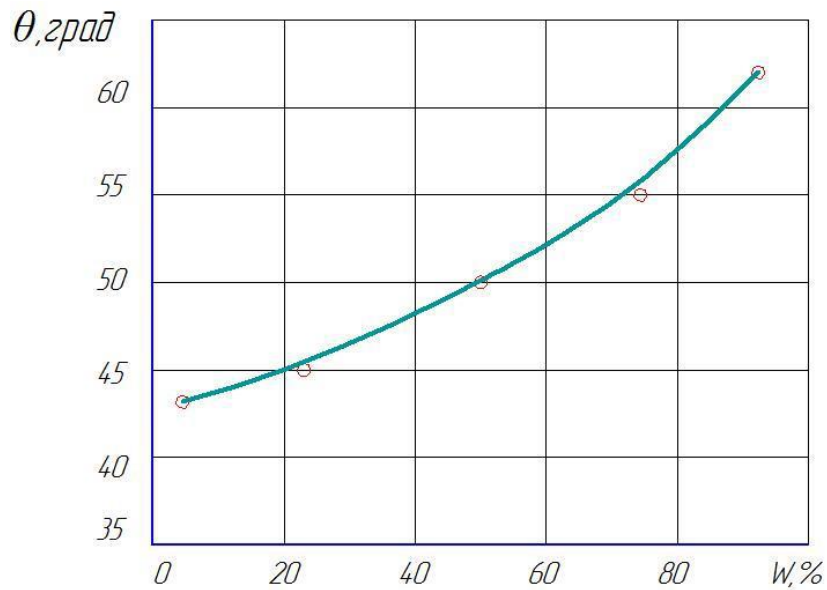


Рис. 3.4 Графік кореляції кута природного укусу солодової дробини від вологості.

Внутрішнє тертя частинок матеріалу залежить від їхньої рухливості в шарі: що більша рухливість, то меншим є кут. Відносна рухливість шару залежить від взаємодії частинок між собою – як сил зчеплення, так і сил тертя, що виникають під час переміщення частинок одна відносно одної.

Графік показує, що кут природного укусу частинок солодової дробини збільшується зі збільшенням вологості. Це пояснюється дією молекулярних сил притягання плівкової рідини, яка знаходиться на поверхні кожної частинки.

3.2. Результати визначення конструктивних і технологічних параметрів гідроциклона-згустувача

Для встановлення впливу конструктивних і технологічних параметрів гідроциклона-згустувача на вологість твердої фракції пивної дробини були проведені лабораторні дослідження із застосуванням методу багатофакторного планування експерименту. Для побудови математичної моделі, що описує вплив конструктивних параметрів фільтраційної поверхні на вологість твердої фракції пивної дробини, було використано симетричний квазі-D-оптимальний план Песочинського для трьох факторів [3].

Таблиця 3.1 містить інформацію про фактори, які впливають на розглядувану характеристику твердої фракції пивної дробини, а також рівні їх варіювання, що були визначені на основі попередніх дослідів [3].

Таблиця 3.1 – Рівні та інтервали варіювання основних факторів під час регресійного аналізу [3].

Рівні варіювання факторів	Фактори			Фактори в закодованому вигляді		
	α , град	L , м	Q , т/год	X_1	X_2	X_3
Верхній	50,0	0,6	30,0	+1	+1	+1
Нижній	10,0	0,2	10,0	-1	-1	-1
Основний	30,0	0,4	20,0	0	0	0
Інтервал варіювання	20,0	0,2	10,0	1	1	1

У результаті проведених досліджень було встановлено, що найбільший вплив на дану характеристику справляють такі фактори: кут нахилу фільтраційної поверхні α , довжина фільтраційної поверхні L та продуктивність гідроциклона-згустувача Q [3].

Для визначення можливості проведення регресійного аналізу був використаний критерій Кохрена з метою перевірки однорідності дисперсій між паралельними експериментами:

$$S_{VMAX}^2 = 0,173; \sum_{V_n=1}^{N_n} S_V^2 = 1,40; G_{расч} = 0,124; \quad (3.1)$$

За рівня значущості 0,05, кількості ступенів свободи $f = n - 1 = 2$ та кількості дослідів $N = 13$ табличне значення критерію Кохрена дорівнює 0,373. Гіпотеза про однорідність паралельних дослідів приймається, оскільки розрахункове значення критерію Кохрена є меншим за табличне [3].

Підставивши відповідні значення основних факторів в рівняння регресії, можна графічно побудувати поверхню відгуку (рис. 3.5). Ця графічна залежність показує, як змінюється вологість твердої фракції пивної дробини W залежно від

кута нахилу фільтраційної поверхні α та довжини фільтраційної поверхні L за продуктивності гідроциклона-згустувача $Q = 10$ т/год [3].

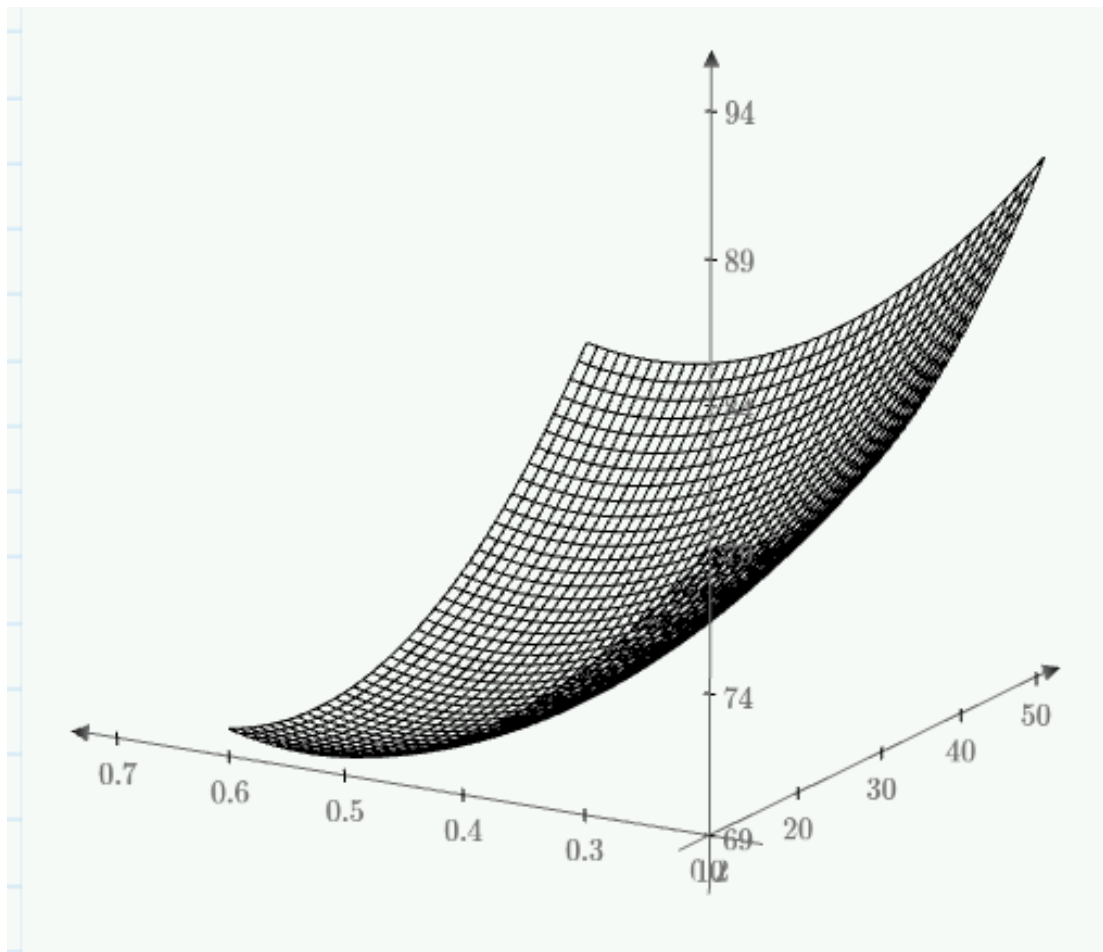


Рис. 3.5. Залежність зміни вологості твердої фракції пивної дробини W від кута нахилу фільтраційної поверхні α та довжини фільтраційної поверхні L за продуктивності гідроциклона-згустувача $Q = 10$ т/год [3].

Щоб визначити оптимальні геометричні параметри смугової обробки, скористаємось побудовою двовимірних перерізів поверхні відгуку (рис. 2). Це дасть змогу графічно встановити, які значення кута нахилу та довжини фільтраційної поверхні забезпечують найкращий результат під час смугової обробки [3].

Аналізуючи поверхні відгуку залежності зміни вологості твердої фракції пивної дробини W від кута нахилу фільтраційної поверхні α , довжини фільтраційної поверхні L та продуктивності гідроциклона-згустувача Q (рис. 3.6.), можна припустити, що мініимальному значенню вологості відповідає

величина 70 %. Тому для забезпечення даного рівня вологості необхідні такі параметри фільтраційної поверхні гідроциклона-згустувача [3]:

- продуктивність гідроциклона-згустувача $Q = 10$ т/год;
- кут нахилу фільтраційної поверхні $\alpha = 10^\circ \dots 30^\circ$;
- довжина фільтраційної поверхні $L = 0,4 \dots 0,6$ м.

Для визначення оптимальних конструктивних параметрів фільтраційної поверхні продиференціюємо рівняння, визначивши похідні першого порядку за кожною змінною і прирівнявши їх до нуля [3].

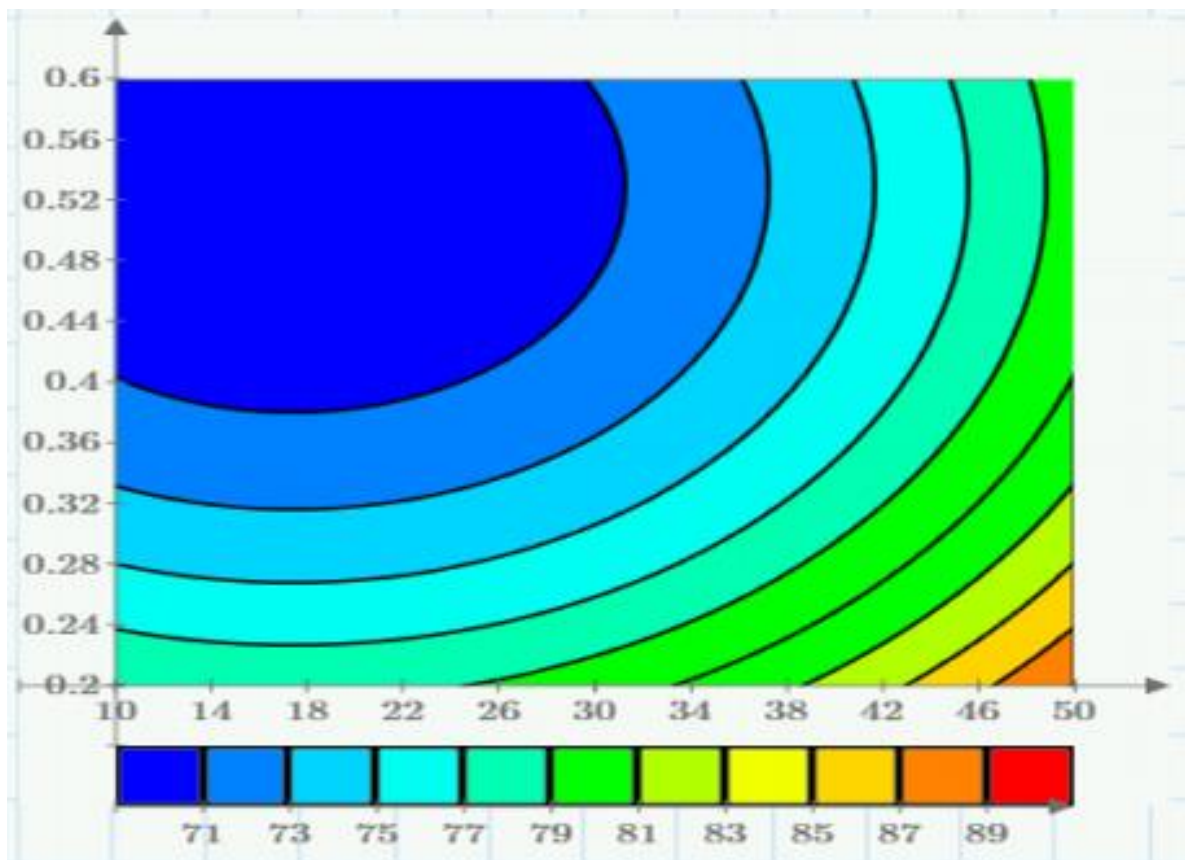


Рис. 3.6. Двовимірні перерізи поверхні відгуку залежності зміни вологості твердої фракції пивної дробини W від кута нахилу фільтраційної поверхні α та довжини фільтраційної поверхні L за продуктивності гідроциклона-згустувача $Q = 10$ т/год [3].

Обрані конструктивні параметри фільтраційної поверхні гідроциклона-згустувача забезпечать ефективне видалення води з твердої фракції пивної дробини [3].

Висновки по розділу

У результаті проведених лабораторних досліджень фізико-механічних властивостей рідкої солодової дробини були отримані такі результати: встановлено питому вагу та насипну густину солодової дробини, визначено коефіцієнт щільності укладання, пористість шару та кути природного укосу, а також проаналізовано гранулометричний склад.

Отримано графічні залежності впливу подачі вихідної маси пивного затору та довжини фільтраційної поверхні на вологість отримуваної твердої фракції. У результаті визначено оптимальні розміри фільтраційної поверхні $L = 0,5\text{--}0,6$ м; встановлено, що найефективніше робочий процес розділення пивного затору на фракції відбувається за подачі вихідної маси $10\text{ м}^3/\text{год}$. Завдяки поєднанню процесів осадження у зоні дії відцентрових сил гідроциклона та фільтрування згущеної маси рідкого пивного затору в згущувачі, вологість отриманого продукту відповідає технологічним вимогам.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Обґрунтовано та розроблено перспективну конструктивно-технологічну схему і конструкцію гідроциклона-згущувача для зневоднення пивної дробини.

Виготовлено та досліджено дослідно-конструкторський зразок гідроциклона-згущувача для зневоднення пивної дробини з раціональними конструктивними параметрами: діаметр циліндричної частини гідроциклона – 220 мм, висота циліндричної частини – 200 мм, висота конічної частини – 850 мм, діаметр фільтраційної поверхні згущувача – 700 мм, діаметр підвідного патрубка гідроциклона – 50 мм.

За результатами лабораторних досліджень експериментального гідроциклона-згущувача для зневоднення пивної дробини з удосконаленням робочим процесом визначено оптимальні його конструктивні параметри: довжина фільтраційної поверхні – 530 мм, кут нахилу фільтраційної поверхні – $17,4^\circ$. Оптимальна продуктивність гідроциклона-згущувача за вихідною масою рідкої пивної дробини, за якої вологість відокремленої твердої фракції відповідає зоотехнічним вимогам, становить $Q = 10 \text{ м}^3/\text{год}$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міненко С. В., Соловійов М.І. Аналіз існуючих конструкцій технічних засобів для обробки вторинних ресурсів пивоварного виробництва. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 352-360.
2. Міненко С.В., Соловійов М.І., Шевчук О.А. Конструкція гідроциклона-згущувача для зневоднення пивної дробини. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). URL: <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.
3. Соловійов М. І. Результати визначення конструктивних і технологічних параметрів гідроциклона-згущувача. Покращення техніко-економічних показників тракторів під час виконання сільськогосподарських операції. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 90-92.
4. Домарецький, В. А. Стан і перспективи розвитку пивоварної промисловості України. Харчова наука і технологія. 2010. № 3 (12). С. 7–9.
5. Олабоді О. В. Пивоварна промисловість: традиції та інновації. Вітчизняний та світовий досвід. Київ : Нац. ун-т харч. технол. 2019. 136 с.
6. Ляшенко М., Проценко Л., Рудик Р., Мелетєєв А. Модельні міні-пивоварні. Харчова і переробна промисловість. 2003. № 4 (284). С. 8–9.
7. Aliyu S., Bala M. Brewer's spent grain: a review of its potentials and applications. *African Journal of Biotechnology*. 2011. Vol. 10, № 3. P. 324–331.

8. Heuzé V., Tran G., Sauvant D., Lebas F. Brewers grains. Feedipedia. Animal Feed Resources Information System. INRAE, CIRAD, AFZ, FAO. 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.feedipedia.org/node/74> (дата звернення: 10.11.2025).
9. Heuzé V., Thiollot H., Tran G., Edouard N., Lessire M., Lebas F. Brewers yeast. Feedipedia. Animal Feed Resources Information System. INRAE, CIRAD, AFZ, FAO. 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.feedipedia.org/node/72> (дата звернення: 10.11.2025).
10. Feedipedia. Spent hops. Feedipedia – Animal Feed Resources Information System. INRAE, CIRAD, AFZ, FAO. 2012. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.feedipedia.org/node/73> (дата звернення: 10.12.2025).
11. Животновод Direct.Farm. Рекомендації по кормленню скота пивної дробиною. *Direct.Farm* (база знань). 10.05.2024. [Електронний ресурс]. URL: <https://direct.farm/post/rekomendatsii-po-kormleniyu-skota-pivnoy-drobinoy-22403> (дата звернення: 09.11.2025).
12. Slavutich-Tara (SLT). Дробина суха : [опис продукту на сайті підприємства]. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://slt-zp.com/catalog/view/drobina-suha> (дата звернення: 09.11.2025).
13. Голубєва Т. А. Поживність сухої пивної дробини та використання її у годівлі молодняку перепелів : автореф. дис. ... канд. с.-г. наук : 06.02.02 / Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2016. 20 с.
14. Wolfgang K. Technologie Brauer und Mälzer. Berlin: VLB Verlag, 2013. 1050 s.
15. Hielscher S.; Gleiß M. Hydrozyklone: Grundlagen, Auslegung und Einsatz in der Verfahrenstechnik. Berlin: De Gruyter, 2017. 310 s.
16. Manke, G.; Hübner, A. Nebenprodukte der Brauerei: Zusammensetzung, Verarbeitung und Nutzung. München: Carl Verlag, 2016. 265 s.