МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
«___»_____ 2026 р.
Зав. кафедри _д.т.н., професор___
(науковий ступінь, вчене звання)
_____ __Володимир ДІДУР___
(підпис) (ініціали, прізвище)

Кваліфікаційна робота (дипломний проект)

перший (бакалаврський)
(назва освітнього рівня)

тема проекту: «Розробка технологічного процесу переробки соняшникового лушпиння на біоетанол з обґрунтуванням конструкційних параметрів основного обладнання»

Виконав: студент _4 курсу, групи 31к-з-ім
освітньої програми___бакалавр_____
спеціальності _208 «Агроінженерія»_
_Харченко Сергій Олександрович_____
(прізвище та ініціали)
Керівник: к.т.н., доцент Пушка О.С.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Умань – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії
Освітня програма «Бакалавр»
Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри
_____ Володимир ДІДУР
«___» _____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ)

Харченку Сергію Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту «Розробка технологічного процесу переробки соняшникового лушпиння на біоетанол з обґрунтуванням конструкційних параметрів основного обладнання»

керівник проекту Пушка Олександр Сергійович, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від
" 01 " травня 2026 р. № 01-06/130
2. Строк подання студентом проекту 18.05.2026 р.
3. Вихідні дані до проекту: характеристика сировини та її підготовка до переробки
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
аналіз стану досліджуваного питання; експериментальні дослідження; питання охорони праці; техніко-економічне обґрунтування проекту.
5. Ілюстративний матеріал: підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 10 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломного проекту: мета і завдання дослідження; конструктивна схема ферментаційної дільниці; ферментаційного обладнання; результати розрахунку економічного ефекту; висновки.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		

7. Дата видачі завдання 26 вересня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	15.10.2025 р.	
2.	Розділ 1. Аналіз технологічного процесу переробки соняшникового лушпиння на біоетанол	19.11.2025 р.	
3.	Розділ 2. Конструкторсько-технологічний розділ	18.12.2025 р.	
4.	Розділ 3. Охорона праці	12.02.2026 р.	
5.	Розділ 4. Техніко-економічна частина	09.03.2026 р.	
6.	Виконання ілюстративної частини проекту	15.04.2026 р.	
7.	Представлення проекту керівнику на перевірку	18.05.2026 р.	

Студент _____ Харченко С.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту _____ Пушка О.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ СОНЯШНИКОВОГО ЛУШПИННЯ НА БІОЕТАНОЛ 6
1.1 Значення використання соняшникового лушпиння як сировини для біоетанолу ... 6
1.2 Характеристика сировини та її підготовка до переробки 7
1.3 Обґрунтування технологічної схеми виробництва біоетанолу 8
1.4 Обґрунтування конструкційних параметрів основного обладнання 9
1.5 Вплив фракційного складу лушпиння на ефективність гідролізу 11
1.6 Порівняльна оцінка способів попередньої обробки соняшникового лушпиння 13
1.7 Система контролю технологічних параметрів виробництва біоетанолу 15
2. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ 18
2.1 Обґрунтування прийнятого конструкторсько-технологічного рішення 18
2.2 Опис удосконаленої технологічної схеми 19
2.3 Конструктивне обґрунтування гідролізатапарата 19
2.4 Розрахунок продуктивності та кількості бражки 20
2.5 Розрахунок ферментаційного обладнання 21
2.6 Конструктивна схема ферментаційної дільниці 22
2.7 Матеріальний баланс конструктивної схеми 23
2.8 Сутність кислотного гідролізу лігноцелюлозної сировини 24
2.9 Особливості протікання кислотного гідролізу целюлози 25
2.10 Утворення побічних продуктів під час гідролізу 25
2.11 Біохімічні основи спиртового бродіння 26
2.12 Перетворення пірувату на етанол 27
2.13 Умови ефективного зброджування гідролізату 28
2.14 Узагальнення біохімічного процесу отримання етанолу 28
3 ОХОРОНА ПРАЦІ 29
3.1 Загальна характеристика умов праці 29
3.2 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори 30
3.3 Вимоги безпеки до обладнання 30
3.4 Пожежна та вибухова безпека 31
3.5 Виробнича санітарія та засоби індивідуального захисту 31
3.6 Вентиляція, аспірація та контроль повітряного середовища 33

3.7 Вимоги до навчання та інструктажів 33
3.8 Дії персоналу в аварійних ситуаціях 34
4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА 35
4.1 Мета техніко-економічного обґрунтування 35
4.2 Річна продуктивність виробництва 35
4.3 Розрахунок матеріальних витрат 35
4.4 Орієнтовна структура експлуатаційних витрат 36
4.5 Розрахунок річного економічного ефекту 38
4.6 Розрахунок строку окупності 38
4.7 Порівняння базового та запропонованого варіантів 39
ВИСНОВОК 41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 43

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ СОНЯШНИКОВОГО ЛУШПИННЯ НА БІОЕТАНОЛ

1.1 Значення використання соняшникового лушпиння як сировини для біоетанолу

Соняшникове лушпиння є побічним продуктом переробки насіння соняшнику на олійно-жирових підприємствах. В умовах України ця сировина має важливе практичне значення, оскільки соняшник належить до основних олійних культур, а його промислова переробка супроводжується утворенням значної кількості рослинних залишків [1; 2]. Традиційно лушпиння використовують як тверде паливо, компонент паливних гранул або допоміжну сировину для енергетичних потреб, однак перспективним напрямом є його біохімічна переробка з одержанням рідкого біопалива — біоетанолу [2; 3].

Соняшникове лушпиння належить до лігноцелюлозної біомаси. Основу такої сировини становлять целюлоза, геміцелюлоза та лігнін [4; 5]. Саме целюлоза й геміцелюлоза є джерелом вуглеводів, які після гідролізу можуть бути перетворені на ферментовані цукри. Лігнін, навпаки, ускладнює доступ ферментів до полісахаридів, тому перед гідролізом необхідно провести попередню обробку сировини [6; 7]. У сучасних технологіях виробництва біоетанолу попередня обробка розглядається як обов’язкова стадія, оскільки вона руйнує щільну структуру лігноцелюлозної маси та підвищує доступність целюлози для ферментативного розщеплення [6; 8].

Використання соняшникового лушпиння для одержання біоетанолу має низку переваг. Сировина не конкурує з харчовою продукцією, утворюється безпосередньо на переробних підприємствах, має стабільне походження та може бути залучена до енергетичного циклу підприємства [2; 3]. Крім того, переробка відходів рослинного походження дає змогу зменшити навантаження на довкілля, підвищити рівень безвідходності виробництва та створити додатковий енергетичний продукт [1; 9].

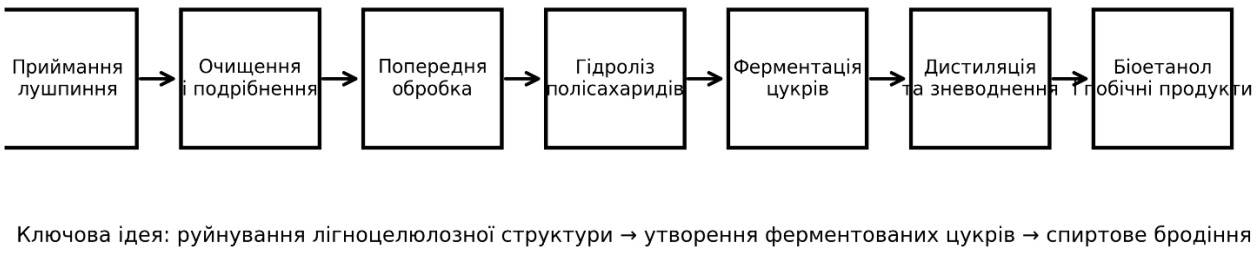


Рисунок 1.1 — Загальна технологічна схема переробки соняшникового лушпиння на біоетанол

1.2 Характеристика сировини та її підготовка до переробки

Для стабільної роботи технологічної лінії соняшникове лушпиння повинно відповідати вимогам щодо вологості, засміченості, фракційного складу та відсутності сторонніх домішок. Надмірна вологість ускладнює зберігання, сприяє розвитку мікрофлори та знижує ефективність подрібнення [9]. Наявність мінеральних домішок, металевих включень або каміння може спричинити пошкодження дробарок, транспортерів і насосного обладнання, тому перед подрібненням сировина повинна проходити очищення.

Першою стадією технологічного процесу є приймання та попереднє очищення лушпиння. На цій стадії сировину пропускають через ситові, повітряні або магнітні сепаратори. Ситові сепаратори видаляють великі механічні домішки, повітряні — пил і легкі включення, а магнітні — металеві частинки. Після очищення лушпиння подрібнюють до фракції, яка забезпечує достатню площу контакту з реагентами та ферментами [6; 7].

За даними наукових джерел, соняшникове лушпиння містить значну кількість целюлози, геміцелюлози та лігніну. У різних дослідженнях зазначається, що частка целюлози в соняшниковому лушпинні може становити приблизно 31–51 %, геміцелюлози — 13–28 %, а лігніну — близько 16–20 % і більше залежно від походження сировини та методики аналізу [4; 5]. Саме такий склад визначає можливість використання лушпиння як сировини для виробництва біоетанолу, але одночасно зумовлює потребу в ефективній попередній обробці [3; 6].

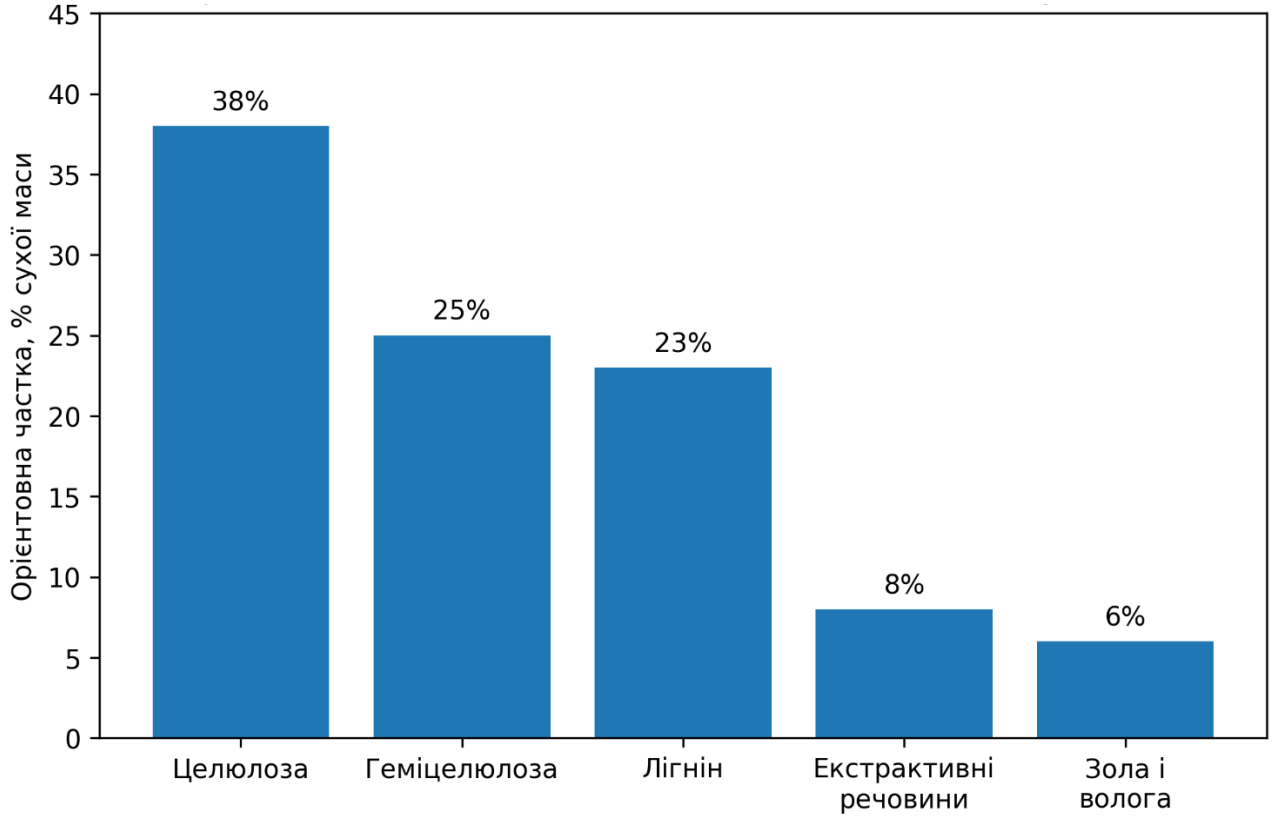


Рисунок 1.2 — Орієнтовний компонентний склад соняшникового лушпиння

1.3 Обґрунтування технологічної схеми виробництва біоетанолу

Технологічний процес переробки соняшникового лушпиння на біоетанол доцільно організувати за такою послідовністю: приймання та зберігання сировини, очищення від сторонніх домішок, подрібнення, попередня фізико-хімічна обробка, гідроліз полісахаридів, нейтралізація та підготовка гідролізату, ферментація цукрів, відокремлення твердої фази, дистиляція бражки, зневоднення етанолу та використання побічних продуктів [6; 8].

Ключовою стадією є попередня обробка. Її завдання полягає у частковому руйнуванні лігноцелюлозного комплексу, зниженні кристалічності целюлози, видаленні частини геміцелюлози та збільшенні доступності сировини для ферментів [6; 7]. У практиці виробництва біоетанолу застосовують кислотну, лужну, паровибухову, органосольвентну, ферментативну та комбіновану обробку [6; 8]. У разі використання соняшникового лушпиння доцільною є комбінована схема, яка включає механічне подрібнення, термохімічну попередню обробку та подальший ферментативний гідроліз [3; 7].

Ферментативний гідроліз забезпечує перетворення целюлози та геміцелюлози на прості цукри. Основними ферментами є целюлази, геміцелюлази та β-глюкозидази.

Після гідролізу утворюється розчин цукрів, який може бути використаний для спиртового бродіння [6; 8]. Для ферментації найчастіше застосовують дріжджі Saccharomyces cerevisiae, оскільки вони широко використовуються у спиртовому виробництві та здатні ефективно перетворювати глюкозу на етанол в анаеробних умовах [10; 11]. У сучасних технологіях також розглядають мікроорганізми, здатні зброджувати пентози, оскільки в гідролізатах лігноцелюлозної сировини присутні не лише гексози, а й пентозні цукри [6; 8].

Ферментація відбувається у ферментері при контрольованій температурі, кислотності середовища, концентрації сухих речовин і тривалості процесу. Після завершення бродіння отриману бражку направляють на дистиляцію, де етанол відокремлюють від води та інших компонентів. Для одержання паливного біоетанолу необхідне додаткове зневоднення, оскільки після звичайної ректифікації вміст води залишається надто високим [6; 10].

1.4 Обґрунтування конструкційних параметрів основного обладнання

Основним обладнанням у технологічному процесі є ферментер, у якому відбувається спиртове бродіння гідролізату. Його конструкція повинна забезпечувати рівномірне перемішування, підтримання стабільної температури, відведення вуглекислого газу, санітарну обробку внутрішніх поверхонь і можливість контролю основних параметрів процесу [10; 12].

Ферментер для виробництва біоетанолу з гідролізату соняшникового лушпиння доцільно виконувати у вигляді вертикальної циліндричної ємності з еліптичним або конічним днищем. Така форма спрощує вивантаження бражки, знижує застійні зони та полегшує промивання. Корпус апарата виготовляють із корозійностійкої сталі, оскільки середовище може мати кислу реакцію та містити органічні кислоти [12].

Основні конструкційні елементи ферментера: корпус циліндричної форми, теплообмінна сорочка або внутрішній змійовик, мішалка з вертикальним валом, патрубок подачі підготовленого гідролізату, патрубок внесення дріжджової культури, газовідвід для CO_2, люк для огляду та санітарної обробки, патрубок вивантаження бражки, контрольно-вимірювальні прилади [10; 12]. Об’єм ферментера визначають за добовою продуктивністю лінії, тривалістю бродіння та коефіцієнтом заповнення. Розрахунковий об’єм можна визначити за формулою:

$$V = \frac{Q \cdot \tau}{k} \tag{1.1}$$

де V — повний об’єм ферментера, м³;

Q — добова кількість підготовленого гідролізату, м³/добу;

τ — тривалість ферментації, доба;

k — коефіцієнт заповнення апарата.

Коефіцієнт заповнення зазвичай приймають 0,75–0,85, оскільки під час бродіння утворюється піна та виділяється CO_2 [10; 12]. Якщо прийняти продуктивність за гідролізатом $Q = 4{,}0$ м³/добу, тривалість ферментації $\tau = 2$ доби, а коефіцієнт заповнення $k = 0{,}8$ тоді:

$$V = \frac{4{,}0 \cdot 2}{0{,}8} = 10{,}0 \text{ м}^3$$

Отже, для заданих умов доцільно застосувати ферментер повним об’ємом близько 10 м³. Робочий об’єм такого апарата становитиме приблизно 8 м³.

Для забезпечення рівномірного розподілу дріжджової культури та поживних речовин ферментер обладнують мішалкою. Частота обертання мішалки повинна бути достатньою для перемішування, але не надмірною, щоб не пошкоджувати клітини дріжджів і не збільшувати енергоспоживання. Доцільно використовувати лопатеву або якірну мішалку з частотою обертання 40–80 хв$^{-1}$ [12].

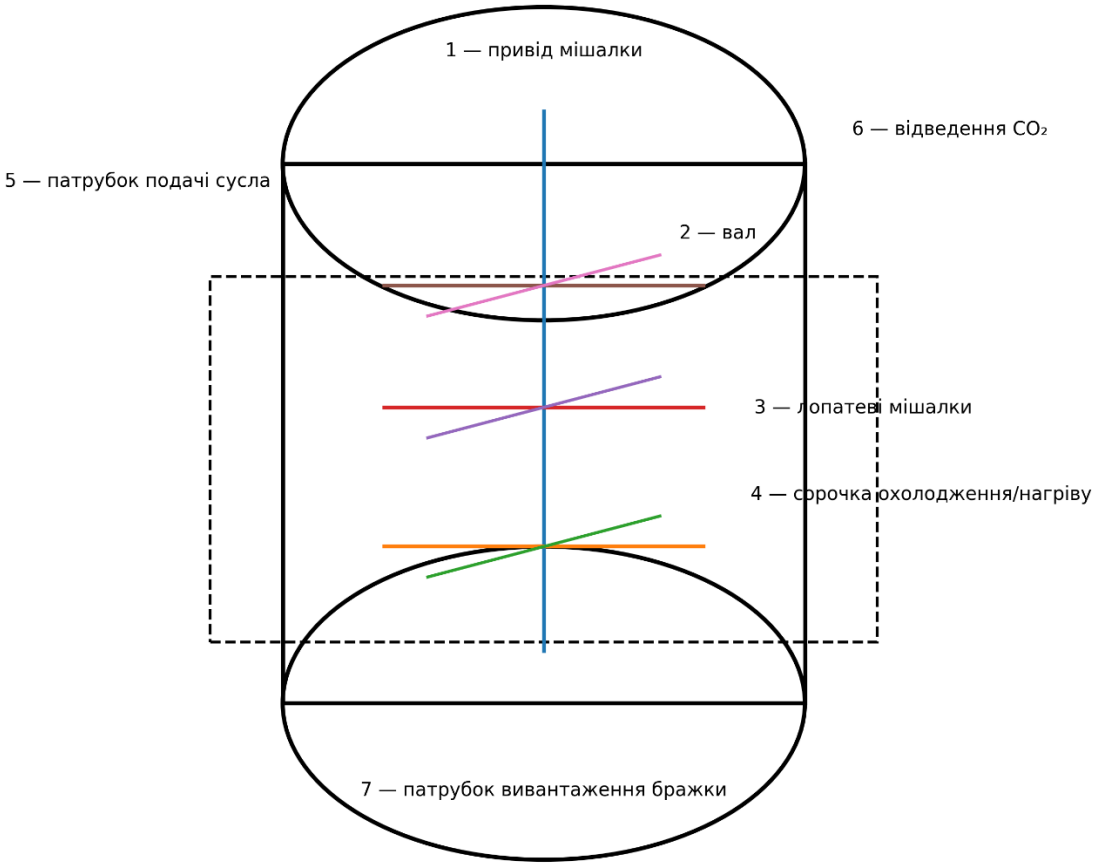


Рисунок 1.3 — Схема основного обладнання — ферментера для спиртового бродіння

Встановлено, що соняшникове лушпиння є перспективною лігноцелюлозною сировиною для виробництва біоетанолу. Його переробка дає можливість підвищити ефективність використання відходів олійно-жирового виробництва та отримати додатковий енергетичний продукт [1; 2; 3]. Основною технологічною проблемою є наявність лігніну, який перешкоджає доступу ферментів до целюлози й геміцелюлози. Тому до складу технологічної схеми обов'язково включають попередню обробку, гідроліз, ферментацію, дистиляцію та зневоднення етанолу [6; 8].

Як основне обладнання обґрунтовано ферментер вертикального типу з мішалкою, теплообмінною сорочкою та системою відведення CO_2. Для прикладу розраховано повний об'єм ферментера 10 м³ за робочого об'єму близько 8 м³. Запропонована схема може бути використана як основа для подальшого розрахунку технологічної лінії та техніко-економічного обґрунтування виробництва.

1.5 Вплив фракційного складу лушпиння на ефективність гідролізу

Одним із важливих параметрів підготовки соняшникового лушпиння до переробки є розмір частинок після подрібнення. У попередніх підрозділах зазначено, що подрібнення необхідне для збільшення площі контакту сировини з реагентами та ферментами . Це має безпосередній вплив на ефективність гідролізу, оскільки чим більша поверхня контакту, тим швидше кислота або ферментативні системи проникають у структуру лігноцелюлозної маси.

Соняшникове лушпиння має щільну волокнисту структуру, тому надто великі частинки погано змочуються розчином кислоти, а внутрішні шари матеріалу залишаються менш доступними для реакції. У такому випадку частина целюлози та геміцелюлози не переходить у розчинні цукри, що знижує загальний вихід біоетанолу. Водночас надмірне подрібнення також небажане, оскільки воно збільшує витрати електроенергії, сприяє утворенню пилу, ускладнює фільтрацію та може погіршувати роботу транспортерів і дозаторів.

Оптимальним для технологічного процесу можна вважати подрібнення до фракції 3–5 мм. Такий розмір частинок забезпечує достатню площу контакту, але не створює надмірного пилового навантаження на виробничу дільницю. Крім того, фракція 3–5 мм є зручною для подавання у гідролізатапарат і забезпечує рівномірне проходження розчину кислоти крізь шар сировини.

Таблиця 1.1 — Орієнтовний вплив розміру частинок на технологічні показники гідролізу

Середній розмір частинок, мм	Доступність целюлози	Умовний вихід редукуючих цукрів, %	Технологічна оцінка
1–2	Дуже висока	75–78	Високий вихід, але значне пилоутворення
3–5	Висока	61–71	Оптимальний режим для виробництва
6–8	Середня	52–58	Можливе неповне розщеплення сировини
9–10	Низька	45–48	Недостатня ефективність гідролізу

На рис. 1.4 показано умовну залежність виходу редукуючих цукрів від середнього розміру частинок лушпиння.

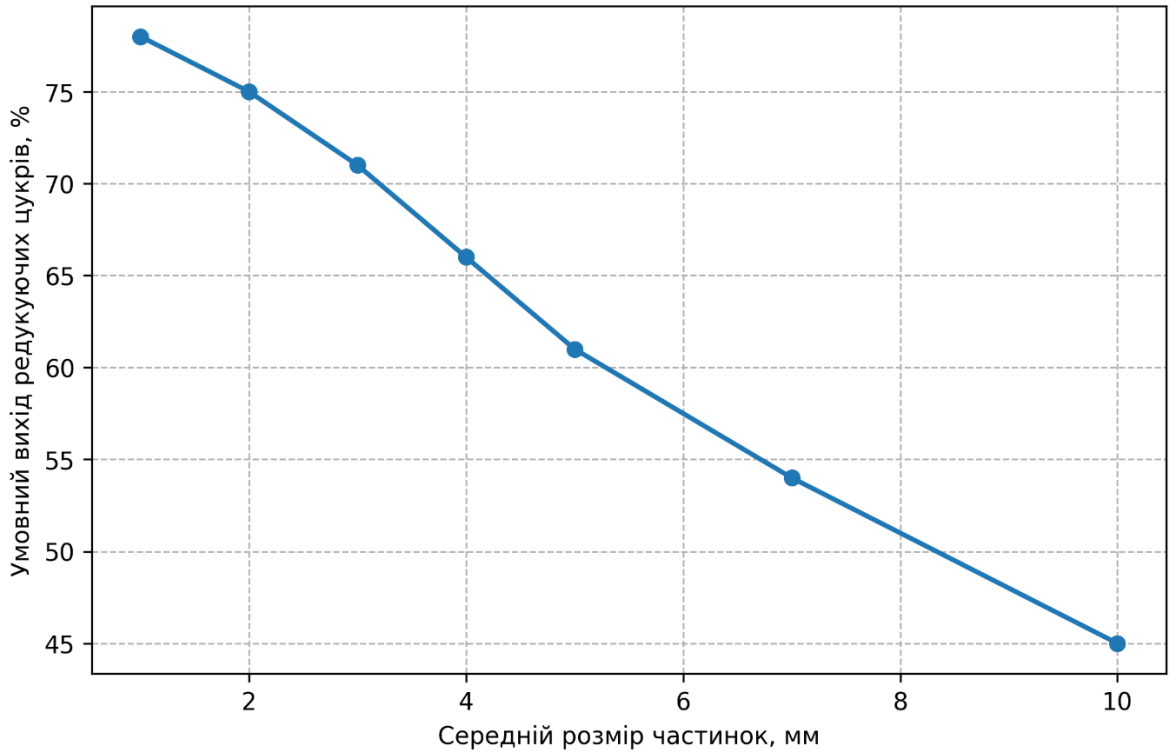


Рисунок 1.4 — Вплив розміру частинок лушпиння на умовний вихід редукуючих цукрів

Для практичного використання можна застосувати коефіцієнт доступності сировини:

$$K_д = S_ф / S_{max} \quad (1.2)$$

де $K_д$ — коефіцієнт доступності поверхні сировини;

$S_ф$ — фактична питома поверхня подрібненої сировини, м²/кг;

S_{max} — максимально доцільна питома поверхня сировини, м²/кг.

Чим ближче значення $K_д$ до 1, тим вищою є доступність целюлози для гідролізу. Однак у виробничих умовах не завжди доцільно прагнути максимального подрібнення, оскільки економія реагентів може бути меншою за додаткові витрати електроенергії на дроблення.

1.6 Порівняльна оцінка способів попередньої обробки соняшникового лушпиння

Перед гідролізом лігноцелюлозна сировина потребує попередньої обробки. Її призначення полягає у послабленні зв'язків між лігніном, целюлозою та геміцелюлозою, а також у підвищенні доступності полісахаридів для подальшого розщеплення. У наданому тексті вже зазначено, що у виробництві біоетанолу можуть застосовуватися кислотна, лужна, паровибухова, органосольвентна, ферментативна та комбінована обробка .

Кислотна обробка є доцільною для соняшникового лушпиння, оскільки вона дозволяє швидко перевести частину геміцелюлози та целюлози у розчинні цукри. Її перевагою є відносна технологічна простота, можливість застосування стандартного обладнання та достатньо висока швидкість процесу. Недоліком є корозійна дія кислоти, необхідність футерування апаратів, подальша нейтралізація гідролізату та можливе утворення інгібіторів бродіння.

Лужна обробка краще руйнує лігнінову частину сировини, однак потребує значних витрат реагентів і подальшого очищення стічних вод. Паровибухова обробка забезпечує механічне руйнування структури біомаси, але вимагає складнішого обладнання, здатного працювати під високим тиском. Ферментативна обробка є екологічнішою, але її швидкість нижча, а вартість ферментних препаратів може істотно збільшувати собівартість продукції.

Таблиця 1.2 — Порівняння способів попередньої обробки соняшникового лушпиння

Спосіб обробки	Переваги	Недоліки	Доцільність для проєкту
Кислотна	Висока швидкість, добра розчинність геміцелюлози, відпрацьована технологія	Корозія обладнання, потреба в нейтралізації	Висока
Лужна	Ефективне руйнування лігніну	Витрати лугу, складні стічні води	Середня
Паровибухова	Інтенсивне розкриття структури біомаси	Високий тиск, складніше обладнання	Середня
Ферментативна	М’які умови, менше побічних продуктів	Тривалість процесу, вартість ферментів	Обмежена
Комбінована	Найкраща доступність целюлози, вища гнучкість процесу	Складніша схема, більші капітальні витрати	Висока

На підставі порівняння можна зробити висновок, що для умов проєктованої лінії найбільш доцільною є кислотна або комбінована попередня обробка. Кислотний варіант є простішим для реалізації та добре поєднується з подальшою нейтралізацією й ферментацією. Комбінований варіант може бути перспективним для майбутньої модернізації, якщо виникне потреба підвищити вихід цукрів і зменшити втрати сировини.

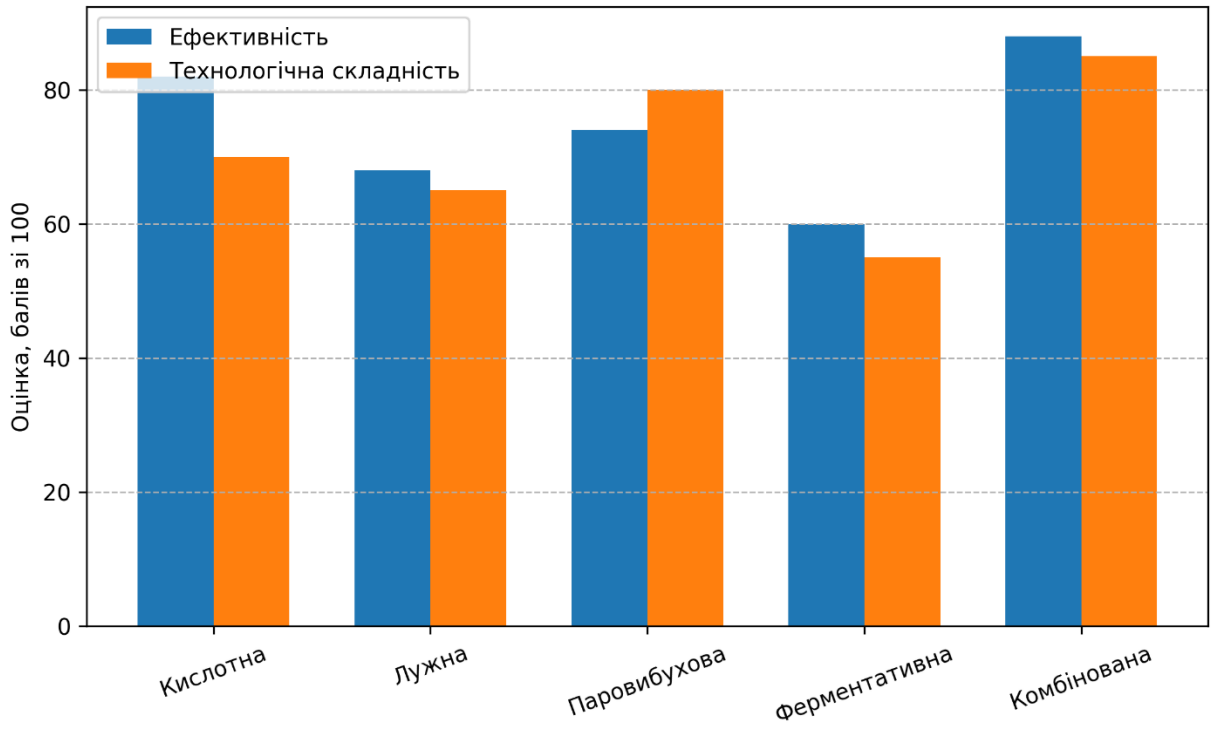


Рисунок 1.5 — Порівняльна оцінка способів попередньої обробки

Для вибору способу обробки можна використати узагальнений критерій технологічної ефективності:

$$E_{\text{т}} = Y_{\text{ц}} \cdot K_{\text{я}} C_{\text{р}} \cdot T \tag{1.3}$$

де $E_{\text{т}}$ — умовний показник ефективності попередньої обробки;

$Y_{\text{ц}}$ — вихід ферментованих цукрів, %;

$K_{\text{я}}$ — коефіцієнт якості гідролізату;

$C_{\text{р}}$ — відносні витрати реагентів;

T — тривалість процесу, год.

Чим більшим є значення $E_{\text{т}}$, тим вигіднішим є спосіб обробки для конкретних виробничих умов.

1.7 Система контролю технологічних параметрів виробництва біоетанолу

Стабільність виробництва біоетанолу значною мірою залежить від контролю основних параметрів процесу. Оскільки технологічна схема включає кілька різних за природою стадій — механічну підготовку, кислотний гідроліз, нейтралізацію, ферментацію, дистиляцію та зневоднення — для кожної з них необхідно передбачити власні контрольовані показники.

На стадії підготовки сировини контролюють вологість, ступінь засміченості та

фракційний склад. Якщо вологість лушпиння надто висока, погіршується його зберігання та подрібнення. Якщо частинки надто великі, знижується ефективність гідролізу. Якщо утворюється надто багато пилу, підвищується пожежна небезпека й ускладнюються умови праці.

На стадії кислотного гідролізу найважливішими параметрами є температура, тиск, концентрація кислоти та тривалість процесу. Недостатня температура призводить до неповного розщеплення целюлози, а надмірна — до руйнування цукрів і утворення інгібіторів. Тому гідролізатапарат повинен бути обладнаний датчиками температури, манометрами, засобами контролю рівня та системою регулювання подачі кислоти.

На стадії нейтралізації основним показником є pH. Перед ферментацією гідролізат повинен мати слабокислу реакцію, оскільки саме такий діапазон є сприятливим для дріжджів. У наданому тексті для ферментації наведено значення pH близько 4,5, а для підготовки гідролізату після нейтралізації — 4,6–5,2 .

Таблиця 1.3 — Основні контрольовані параметри технологічного процесу

Стадія процесу	Контрольований параметр	Рекомендоване значення	Наслідки відхилення
Зберігання лушпиння	Вологість	До 10–12 %	Самозігрівання, пліснява, погане подрібнення
Подрібнення	Розмір частинок	3–5 мм	Неповний гідроліз або надмірне пилоутворення
Кислотний гідроліз	Температура	180–190 °C	Руйнування цукрів або низький вихід
Кислотний гідроліз	Тиск	1–1,5 МПа	Нестабільність процесу
Кислотний гідроліз	Концентрація H_2SO_4	0,2–1,0 %	Корозія або неповне розщеплення
Нейтралізація	pH	4,6–5,2	Пригнічення дріжджів
Ферментація	Температура	32–34 °C	Зниження активності культури
Ферментація	pH	Близько 4,5	Ризик зараження або сповільнення бродіння
Дистиляція	Міцність спирту	94–96 % після ректифікації	Погіршення якості продукту

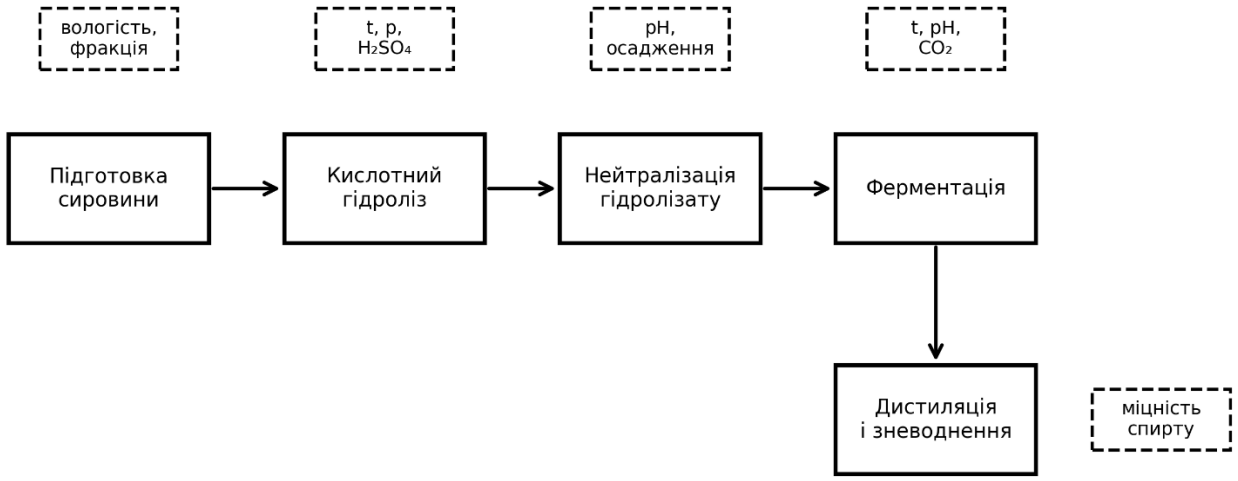


Рисунок 1.6 — Система контролю основних параметрів технологічного процесу

Для оцінки стабільності процесу можна використати коефіцієнт технологічної стабільності:

$$K_{\text{ст}} = N_{\text{н}} / N_{\text{з}} \tag{1.4}$$

де $K_{\text{ст}}$ — коефіцієнт стабільності технологічного режиму;

$N_{\text{н}}$ — кількість параметрів, які перебувають у нормативному діапазоні;

$N_{\text{з}}$ — загальна кількість контрольованих параметрів.

Наприклад, якщо з 9 контрольованих параметрів 8 перебувають у допустимих межах, тоді: $K_{\text{ст}} = 89 = 0{,}89$.

Значення $K_{\text{ст}} = 0{,}89$ свідчить про достатньо стабільну роботу технологічної лінії, однак потребує контролю параметра, який вийшов за межі норми. Для високоефективного виробництва бажано підтримувати цей коефіцієнт на рівні не нижче 0,90–0,95.

2. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Обґрунтування прийнятого конструкторсько-технологічного рішення

Конструкторський розділ присвячено розробці та обґрунтуванню технологічного комплексу для переробки соняшникового лушпиння на біоетанол. Основним завданням розділу є поєднання технологічних операцій підготовки сировини, кислотного гідролізу, ферментації, сепарації дріжджів і брагоректифікації в єдину виробничу систему з вибором основного обладнання та визначенням його параметрів.

Соняшникове лушпиння є лігноцелюлозною сировиною, тому його безпосереднє зброджування спиртовими дріжджами є неможливим. Перед ферментацією необхідно зруйнувати структуру целюлозно-лігнінового комплексу та перевести частину полісахаридів у розчинні цукри. У проєктованій технології для цього прийнято кислотний гідроліз розбавленою сульфатною кислотою. У вихідному матеріалі зазначено, що гідроліз рослинної сировини виконується сульфатною кислотою концентрацією 0,2–1,0 % за температури 180–190 °C і тиску 1–1,5 МПа .

Конструктивно технологічна лінія повинна забезпечувати такі умови:

- рівномірне подавання та подрібнення лушпиння;
- стабільну концентрацію кислоти в зоні гідролізу;
- витримування сировини за підвищеної температури й тиску;
- відведення гідролізату без потрапляння значної кількості лігнінової фракції;
- нейтралізацію кислого середовища перед ферментацією;
- підтримання температури бродіння 32–34 °C;
- повернення дріжджової біомаси у ферментаційний контур;
- безперервне виділення та концентрування етанолу.

Загальна схема запропонованого рішення наведена на рис. 2.1.

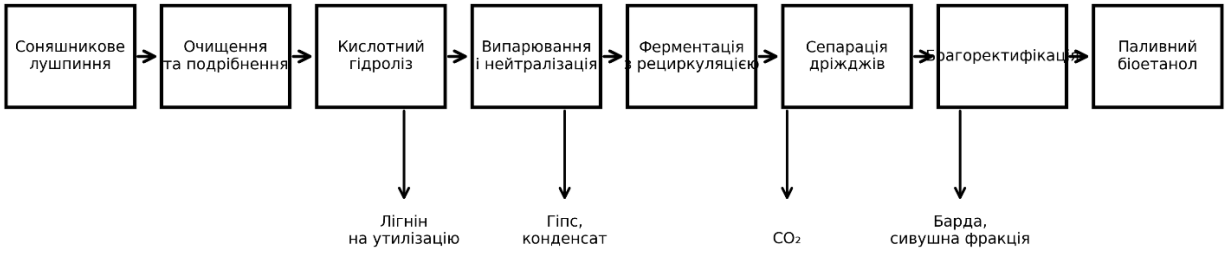


Рисунок 2.1 — Конструкторсько-технологічна схема переробки соняшникового лушпиння на біоетанол

2.2 Опис удосконаленої технологічної схеми

Технологічний процес починається з приймання соняшникового лушпиння. Сировина надходить на підприємство автомобільним або іншим транспортом, після чого спрямовується на дільницю очищення. На цій стадії видаляють мінеральні домішки, металеві включення, пил і сторонні частинки. Далі лушпиння подрібнюють до фракції 3–5 мм. Такий розмір частинок є доцільним, оскільки він збільшує площу контакту сировини з кислотою, але не призводить до надмірного утворення пилу.

Після механічної підготовки сировина подається в гідролізатапарат. У ньому відбувається обробка розбавленою сульфатною кислотою при високій температурі. Прийнята схема передбачає перколяційний режим: кислота проходить через шар подрібненої сировини, розчиняє продукти гідролізу та виводить їх у вигляді гідролізату. За рахунок цього зменшується час перебування цукрів у зоні високої температури, що знижує ризик їх руйнування та утворення інгібіторів ферментації.

Після гідролізу рідка фаза направляється на випарювання, охолодження та нейтралізацію. У процесі нейтралізації pH доводять до 4,6–5,2, що є прийнятним для подальшого зброджування. У вихідному тексті також передбачено додавання мінеральних речовин: сірчанокислого амонію, фосфорнокислого амонію та фосфорної кислоти, оскільки соняшникова сировина є бідною на азот і фосфор .

Підготовлений гідролізат охолоджується до температури ферментації та подається у ферментери. У проєкті прийнято безперервне зброджування з рециркуляцією біомаси дріжджів. Після ферментації бражка надходить на сепаратор, де дріжджі відділяються та повертаються в процес, а освітлена бражка спрямовується на брагоректифікаційну установку.

2.3 Конструктивне обґрунтування гідролізатапарата

Основним апаратом стадії підготовки ферментованого субстрату є гідролізатапарат. Він призначений для кислотної обробки подрібненого соняшникового лушпиння та одержання гідролізату, що містить розчинні цукри. Апарат доцільно виконувати у вигляді вертикального циліндричного корпусу з верхнім і нижнім конусами. Така форма забезпечує зручне завантаження сировини, рівномірне проходження кислоти крізь шар матеріалу та видалення лігнінового залишку.

Внутрішня поверхня апарата повинна бути захищена кислотостійким футеруванням. Це пояснюється тим, що процес відбувається в кислому середовищі при

температурі до 190 °C і тиску до 1,5 МПа. Для футерування можна застосовувати кислототривку кераміку, графітові плитки або інші матеріали, стійкі до дії гарячої розбавленої кислоти.

Основні конструктивні елементи гідролізатапарата:

– циліндричний корпус;
– верхній завантажувальний конус;
– нижній конус для вивантаження лігніну;
– патрубок подачі кислоти;
– патрубок відведення гідролізату;
– фільтрувальна зона;
– кислотостійке футерування;
– контрольно-вимірювальні прилади температури, тиску та концентрації кислоти.

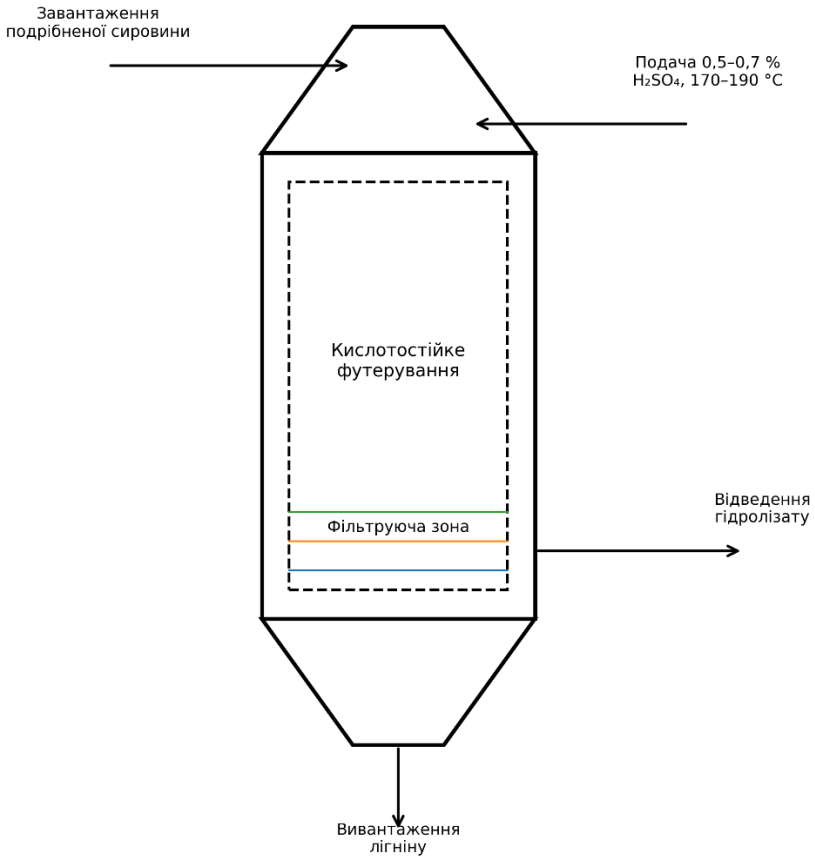


Рисунок 2.2 — Схема гідролізатапарата перколяційного типу

2.4 Розрахунок продуктивності та кількості бражки

Згідно з вихідними даними, добовий вихід біоетанолу становить 25 т/добу. У наданому матеріалі зазначено, що бражка перед надходженням на брагоректифікацію

містить близько 1,5 % спирту . Тоді потрібна добова кількість бражки визначається за формулою:

$$m_{\text{бр.доб}} = m_{\text{сп.доб}} / c_{\text{сп}} \quad (2.1)$$

де $m_{\text{бр.доб}}$ — добова маса бражки, т/добу;

$m_{\text{сп.доб}}$ — добова маса біоетанолу, т/добу;

$c_{\text{сп}}$ — масова частка спирту в бражці.

Підставляємо значення:

$$m_{\text{бр.доб}} = \frac{25}{0{,}015} = 1667 \text{ т/добу}$$

Годинна продуктивність за бражкою:

$$m_{\text{бр.год}} = \frac{1667}{24} = 69{,}5 \text{ т/год}$$

Отже, для забезпечення виробництва 25 т біоетанолу на добу технологічна лінія повинна забезпечувати переробку приблизно 1667 т бражки на добу, або 69–70 т/год.

2.5 Розрахунок ферментаційного обладнання

У вихідному матеріалі для ферментера прийнято об’єм 100 м³, а питому швидкість росту дріжджів $f = 0{,}37$ год$^{-1}$. Швидкість протоку через один ферментер визначається за формулою:

$$u = V_p \cdot f \quad (2.2)$$

де u — об’ємна швидкість протоку, м³/год;

V_p — робочий об’єм ферментера, м³;

f — питома швидкість росту дріжджів, год$^{-1}$.

$$u = 100 \cdot 0{,}37 = 37 \text{ м}^3\text{/год}$$

За густини середовища $\rho = 1068$ кг/м^3:

$$G = u \cdot \rho = 37 \cdot 1068 = 39516 \text{ кг/год}=39{,}5 \text{ т/год}$$

Оскільки необхідна продуктивність за бражкою становить приблизно 69,5 т/год, одного ферментера недостатньо. Потрібна кількість паралельних ферментаційних ліній:

$$n = 69{,}5/39{,}5 = 1{,}76$$

Приймаємо: $n = 2$.

Отже, для забезпечення заданої продуктивності необхідно встановити дві паралельні батареї ферментерів, кожна з яких працює в безперервному режимі. Таке рішення збільшує надійність виробництва: у разі зупинки однієї лінії друга може частково підтримувати технологічний процес.

2.6 Конструктивна схема ферментаційної дільниці

Ферментаційна дільниця складається з підготовчого ферментера, головного бродильного ферментера, хвостового ферментера та сепаратора. У підготовчий ферментер подається нейтралізований гідролізат і товарна біомаса дріжджів. У головному ферментері відбувається основне зброджування цукрів, а в хвостовому — дозброджування залишкових вуглеводів.

Після ферментації бражка направляється на сепаратор. У сепараторі відокремлюється дріжджова біомаса, яка повертається до початку ферментаційного процесу. Такий підхід дає змогу підвищити концентрацію активних клітин у системі, скоротити тривалість зброджування та зменшити витрати на вирощування нової біомаси.

У вихідному матеріалі зазначено, що сепаратор працює зі швидкістю 4500–6000 об/хв, а продуктивність сепараторів може становити 10–35 м³/год .

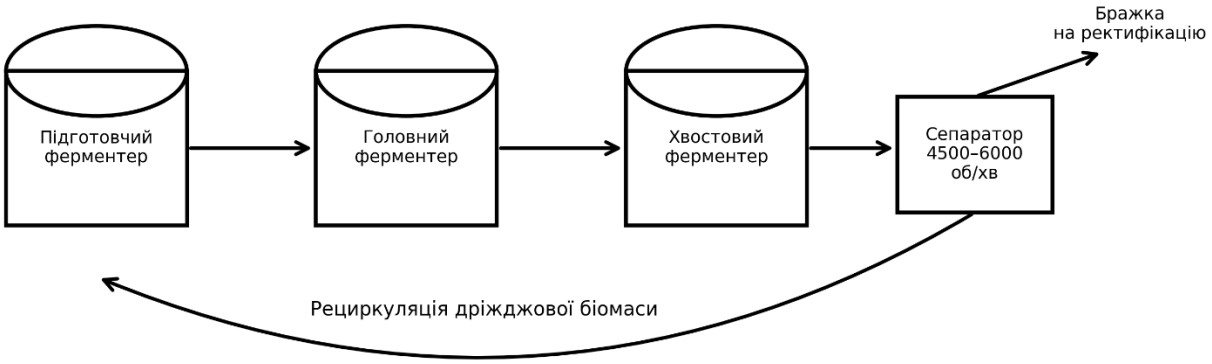


Рисунок 2.3 — Схема безперервної ферментації з поверненням дріжджової біомаси

Таблиця 2.1 — Основні параметри прийнятого обладнання

Обладнання	Призначення	Основні параметри	Обґрунтування вибору
Дробарка	Подрібнення лушпиння	Фракція 3–5 мм	Збільшення площі контакту сировини з кислотою
Гідролізатапарат	Кислотний гідроліз	180–190 °C; 1–1,5 МПа; H_2SO_4 0,2–1,0 %	Руйнування лігноцелюлозної структури
Випарники	Охолодження та часткове концентрування гідролізату	130–140 °C; 105–110 °C	Використання вторинної теплоти
Реактори нейтралізації	Доведення pH	pH 4,6–5,2	Підготовка середовища до

			ферментації
Ферментери	Спиртове бродіння	100 м³; 32–34 °C; pH 4,5	Безперервне зброджування цукрів
Сепаратор	Відділення дріжджів	4500–6000 об/хв	Рециркуляція біомаси
Брагоректифікаційна установка	Виділення етанолу	Бражна, ректифікаційна, метанольна колони	Одержання очищеного біоетанолу

2.7 Матеріальний баланс конструктивної схеми

За вихідним матеріальним балансом на 20 л біоетанолу витрачається 120 кг відходів соняшнику, 9 кг сірчаної кислоти, 1480 кг води, 89,48 кг біомаси дріжджів і 3017,4 кг гострої пари. У результаті одержують 20 кг біоетанолу, 1600 кг барди, 2400 кг лютерної води, 56 кг лігніну, 10,2 кг гіпсу та інші побічні продукти .

Таблиця 2.2 — Узагальнений матеріальний баланс на 20 л біоетанолу

Потік	Кількість, кг	Характеристика
Соняшникове лушпиння	120,0	Основна лігноцелюлозна сировина
Сірчана кислота	9,0	Реагент для гідролізу
Вода	1480,0	Розчинник і технологічне середовище
Біомаса дріжджів	89,48	Біологічний агент ферментації
Гостра пара	3017,4	Джерело теплоти для ректифікації
Біоетанол	20,0	Основний продукт
Барда	1600,0	Побічний продукт ректифікації
Лютерна вода	2400,0	Потік після ректифікації
Лігнін	56,0	Твердий залишок гідролізу
Гіпс	10,2	Осад після нейтралізації

Розроблено узагальнену схему виробництва біоетанолу із соняшникового лушпиння. Основним конструктивним рішенням є використання гідролізатапарата перколяційного типу з кислотостійким футеруванням, який забезпечує обробку подрібненої сировини розбавленою сульфатною кислотою. Для стадії ферментації обґрунтовано застосування двох паралельних батарей ферментерів об’ємом 100 м³ із рециркуляцією дріжджової біомаси.

Розрахунками встановлено, що для виробництва 25 т біоетанолу на добу

необхідно переробляти приблизно 1667 т бражки на добу. Один ферментер об’ємом 100 м³ забезпечує близько 39,5 т/год потоку, тому для досягнення заданої продуктивності прийнято дві паралельні ферментаційні лінії. Запропонована конструктивна схема є технологічно обґрунтованою, оскільки забезпечує безперервність процесу, повторне використання дріжджів і комплексну переробку побічних продуктів.

2.8 Сутність кислотного гідролізу лігноцелюлозної сировини

Переробка соняшникового лушпиння на біоетанол ґрунтується на здатності целюлозної та геміцелюлозної частини сировини перетворюватися на прості цукри, придатні для подальшого зброджування. Оскільки соняшникове лушпиння належить до лігноцелюлозних матеріалів, його структура є досить стійкою до прямого біохімічного розкладання. Целюлозні волокна в такій сировині захищені лігніном і геміцелюлозою, тому ферментні системи дріжджів не можуть безпосередньо використовувати її як поживний субстрат.

Для підготовки сировини до ферментації застосовують кислотний гідроліз. Його основне призначення полягає у руйнуванні глікозидних зв’язків у полісахаридах та утворенні моносахаридів, які можуть бути використані дріжджами під час спиртового бродіння. У процесі гідролізу кислота виконує роль каталізатора, прискорюючи розщеплення довгих ланцюгів целюлози та геміцелюлози.

Механізм кислотного гідролізу целюлози пов’язаний із дією іонів гідронію H_3O^+, які утворюються у водному розчині кислоти. Саме ці іони беруть участь у протонуванні кисню глікозидного зв’язку. Після цього зв’язок між залишками глюкози послаблюється, що створює умови для його розриву. У результаті довгий полімерний ланцюг поступово розпадається на коротші фрагменти, а потім — на окремі молекули цукрів.

Процес можна спрощено подати такою схемою:

$$(C_6H_{10}O_5)n + nH_2O \xrightarrow{H_2SO_4,t} nC_6H_{12}O_6$$

де $(C_6H_{10}O_5)n$ — умовна формула целюлози;

H_2O — вода;

H_2SO_4 — сульфатна кислота як каталізатор;

$C_6H_{12}O_6$ — глюкоза.

Ця реакція є базовою для одержання ферментованих цукрів із целюлозної частини соняшникового лушпиння.

2.9 Особливості протікання кислотного гідролізу целюлози

Кислотний гідроліз целюлози є складним багатостадійним процесом. Його швидкість залежить від температури, концентрації кислоти, тривалості обробки, розміру частинок сировини, ступеня кристалічності целюлози та доступності глікозидних зв’язків для реагенту.

На першій стадії відбувається протонування глікозидного кисню або кисню піранозного кільця. Це призводить до ослаблення зв’язку між мономерними ланками полісахариду. Далі формується проміжний нестійкий стан, який може розглядатися як карбокатіонний комплекс. Після приєднання молекули води відбувається розрив глікозидного зв’язку та утворення нових гідроксильних груп.

Умовно механізм можна подати у такій послідовності:

1. протонування кисню в глікозидному зв’язку;
2. послаблення зв’язку між залишками глюкози;
3. утворення проміжного карбокатіонного стану;
4. приєднання молекули води;
5. розрив полімерного ланцюга;
6. регенерація кислотного каталізатора.

Важливою особливістю целюлози є її надмолекулярна будова. Частина целюлозних ланцюгів перебуває у кристалічному стані, де молекули щільно впорядковані й утримуються водневими зв’язками. Такі ділянки важче піддаються гідролізу. Аморфні зони, навпаки, є менш упорядкованими, тому реагують швидше. Саме тому подрібнення сировини та попередня обробка мають велике значення для підвищення ефективності процесу.

Для соняшникового лушпиння доцільно застосовувати розбавлену сульфатну кислоту за підвищеної температури. Такий режим дає змогу зменшити витрати кислоти, скоротити тривалість обробки та забезпечити достатній вихід розчинних цукрів. Разом із тим надмірне підвищення температури або концентрації кислоти може спричинити небажане руйнування моносахаридів.

2.10 Утворення побічних продуктів під час гідролізу

Однією з головних проблем кислотного гідролізу є не лише одержання цукрів, а й запобігання їх подальшому розкладанню. Після утворення глюкози, ксилози та інших моносахаридів вони можуть піддаватися дегідратації та іншим побічним реакціям. У

результаті утворюються фурфурол, гідроксиметилфурфурол, органічні кислоти та інші речовини, які можуть пригнічувати життєдіяльність дріжджів.

Особливо небезпечними для подальшої ферментації є фурфурол і гідроксиметилфурфурол, оскільки вони знижують активність дріжджових клітин, уповільнюють бродіння та зменшують кінцевий вихід етанолу. Тому режим гідролізу необхідно підбирати так, щоб швидкість розщеплення полісахаридів була достатньо високою, але руйнування утворених цукрів залишалося мінімальним.

Для цього у технологічній схемі доцільно передбачити:

– контроль концентрації кислоти;
– підтримання оптимальної температури;
– обмеження тривалості перебування гідролізату в зоні високої температури;
– швидке відведення рідкої фази з апарата;
– подальшу нейтралізацію кислого гідролізату;
– видалення або зниження концентрації інгібіторів перед ферментацією.

Таким чином, ефективність кислотного гідролізу визначається не лише повнотою розщеплення целюлози, а й якістю отриманого гідролізату. Для спиртового виробництва важливо отримати не просто максимальну кількість цукрів, а такий розчин, який буде придатним для стабільного зброджування.

2.11 Біохімічні основи спиртового бродіння

Після гідролізу та нейтралізації отриманий розчин цукрів направляється на ферментацію. Основним біологічним агентом спиртового бродіння є дріжджі *Saccharomyces cerevisiae*. Вони здатні перетворювати глюкозу та інші доступні цукри на етиловий спирт і вуглекислий газ.

Загальне рівняння спиртового бродіння має вигляд:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2 + Q$$

де $C_6H_{12}O_6$ — глюкоза;

C_2H_5OH — етиловий спирт;

CO_2 — вуглекислий газ;

Q — енергія, що виділяється під час процесу.

Центральним метаболічним шляхом, який забезпечує перетворення цукрів у клітині дріжджів, є гліколіз. У процесі гліколізу молекула глюкози проходить послідовні ферментативні перетворення і розщеплюється до двох молекул пірувату.

При цьому клітина отримує енергію у формі АТФ, яка використовується для підтримання життєдіяльності та росту.

Гліколіз відбувається в цитоплазмі клітини та включає низку реакцій фосфорилювання, ізомеризації, розщеплення, окиснення та утворення енергетичних сполук. Спочатку глюкоза фосфорилюється з утворенням глюкозо-6-фосфату. Далі відбувається її перетворення на фруктозо-6-фосфат, а потім — на фруктозо-1,6-дифосфат. Після цього молекула розщеплюється на дві триози, які в подальшому перетворюються на піруват.

Сумарно одна молекула глюкози під час гліколізу дає дві молекули пірувату та чистий енергетичний вихід у вигляді двох молекул АТФ.

2.12 Перетворення пірувату на етанол

У безкисневих умовах піруват, який утворився внаслідок гліколізу, не переходить у цикл трикарбонових кислот, а спрямовується на спиртове бродіння. Цей процес складається з двох основних реакцій.

На першій стадії піруват декарбоксилюється з утворенням ацетальдегіду та вуглекислого газу:

$$CH_3COCOOH \rightarrow CH_3CHO + CO_2$$

де $CH_3COCOOH$ — піруват;

CH_3CHO — ацетальдегід;

CO_2 — вуглекислий газ.

Ця реакція відбувається за участю ферменту піруватдекарбоксилази. Для її нормального перебігу необхідні кофактори, зокрема тіамінпірофосфат і іони магнію.

На другій стадії ацетальдегід відновлюється до етанолу:

$$CH_3CHO + NADH + H^+ \rightarrow C_2H_5OH + NAD^+$$

Цю реакцію каталізує алкогольдегідрогеназа. Її значення полягає не лише в утворенні етанолу, а й у відновленні NAD^+, який знову може брати участь у гліколізі. Таким чином, спиртове бродіння забезпечує безперервність енергетичного обміну клітини в анаеробних умовах.

У результаті процесу утворюються два основні продукти: етиловий спирт і вуглекислий газ. Етанол накопичується в бражці, а CO_2 виділяється з ферментаційного апарата через газовідвідну систему.

2.13 Умови ефективного зброджування гідролізату

Ефективність спиртового бродіння залежить від якості підготовленого гідролізату та умов культивування дріжджів. Найважливішими параметрами є температура, кислотність середовища, концентрація цукрів, вміст інгібіторів, кількість активної біомаси та санітарний стан обладнання.

Для нормальної роботи дріжджів необхідно підтримувати температуру в межах 30–34 °C. За нижчої температури швидкість ферментації зменшується, а за надмірного нагрівання клітини втрачають активність. Оптимальне значення pH для спиртового бродіння зазвичай перебуває в слабокислому діапазоні, близько 4,5–5,0. Таке середовище сприятливе для дріжджів і водночас обмежує розвиток небажаної мікрофлори.

Оскільки соняшникове лушпиння містить недостатню кількість азоту та фосфору, до гідролізату доцільно додавати мінеральні солі. Вони забезпечують дріжджові клітини необхідними елементами живлення, сприяють їх активному розмноженню та стабільному утворенню етанолу.

Важливо також контролювати концентрацію інгібіторів, які можуть утворитися під час кислотного гідролізу. Якщо вміст фурфуролу, гідроксиметилфурфуролу або органічних кислот буде надмірним, процес бродіння сповільниться, а вихід спирту зменшиться. Тому після гідролізу передбачають стадії охолодження, нейтралізації, відстоювання та підготовки поживного середовища.

2.14 Узагальнення біохімічного процесу отримання етанолу

Отримання біоетанолу із соняшникового лушпиння можна розглядати як поєднання двох взаємопов’язаних процесів: хімічного та біохімічного. На першому етапі за допомогою кислотного гідролізу складні полісахариди сировини перетворюються на прості цукри. На другому етапі дріжджові клітини використовують ці цукри в процесі гліколізу та спиртового бродіння, утворюючи етанол і вуглекислий газ.

Загальну логіку процесу можна подати так:

$$\text{Целюлоза} \rightarrow \text{Глюкоза} \rightarrow \text{Піруват} \rightarrow \text{Ацетальдегід} \rightarrow \text{Етанол}$$

Кожна стадія має важливе технологічне значення. Гідроліз визначає кількість доступних цукрів, гліколіз забезпечує утворення пірувату та енергії для клітини, а спиртове бродіння завершує перетворення субстрату на етиловий спирт.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1 Загальна характеристика умов праці

Технологічний процес переробки соняшникового лушпиння на біоетанол пов’язаний із дією комплексу виробничих факторів. До них належать запиленість повітря під час приймання, транспортування та подрібнення лушпиння, використання кислотних або лужних реагентів під час попередньої обробки, підвищена температура окремих апаратів, рухомі частини машин, виділення CO_2 під час ферментації, а також пожежна небезпека етанолу та пилоповітряних сумішей [13; 14; 15].

Особливу увагу необхідно приділяти пожежній безпеці, оскільки підприємства, що працюють з рослинною сировиною, мають підвищений ризик займання через наявність органічного пилу, залишків біомаси, мастильних матеріалів і горючих продуктів переробки. В Україні чинні спеціальні правила пожежної безпеки для підприємств з переробки ефірно-олійної сировини, які встановлюють організаційні та технічні вимоги до безпечної експлуатації таких виробництв [13]. Пожежна безпека виробничих процесів також повинна відповідати загальним вимогам системи стандартів безпеки праці [14].

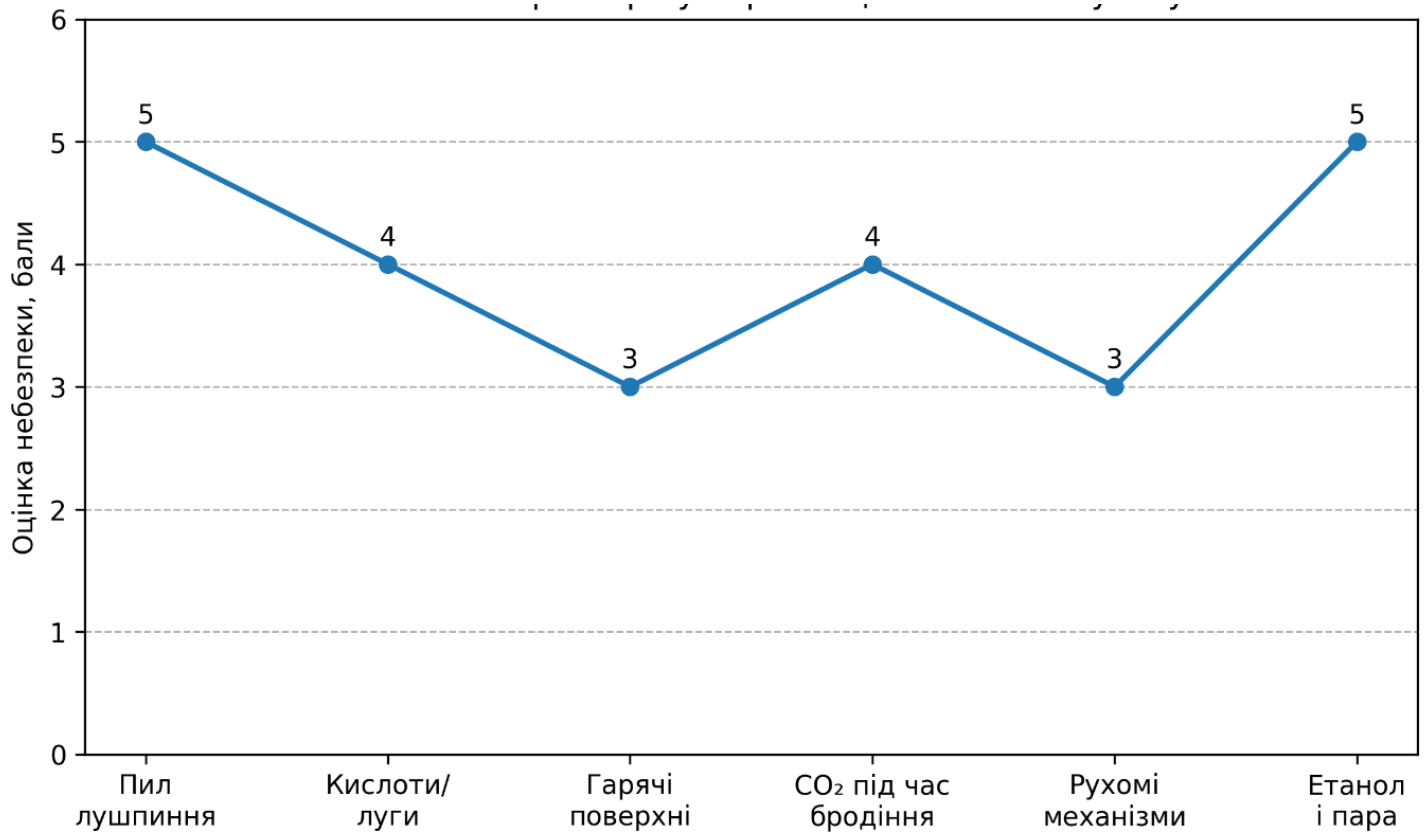


Рисунок 3.1 — Основні небезпечні фактори у виробництві біоетанолу з соняшникового лушпиння

3.2 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори

Під час виробництва біоетанолу з соняшникового лушпиння можуть виникати такі небезпечні та шкідливі фактори:

– підвищена запиленість повітря робочої зони;

– шум і вібрація від дробарок, вентиляторів, насосів і транспортерів;

– ризик травмування рухомими елементами обладнання;

– небезпека хімічних опіків під час роботи з кислотою або лугами;

– підвищена температура поверхонь апаратів, трубопроводів і теплообмінників;

– можливість перевищення тиску в гідролізатапараті;

– накопичення CO_2 у ферментаційному відділенні;

– пожежна небезпека етанолу, спиртових парів і пилоповітряних сумішей;

– ураження електричним струмом;

– небезпека падіння під час обслуговування резервуарів, колон і майданчиків [1; 2; 6].

Особливої уваги потребує пил соняшникового лушпиння. Органічний пил не лише негативно впливає на органи дихання працівників, а й може утворювати вибухонебезпечні пилоповітряні суміші. Найбільше пилу утворюється під час пересипання, транспортування, подрібнення та завантаження лушпиння в апарати. Тому такі операції повинні виконуватися в закритому або напівзакритому обладнанні з місцевою витяжною вентиляцією та фільтрацією повітря [2; 5].

3.3Вимоги безпеки до обладнання

Усе технологічне обладнання повинно бути встановлене на міцних фундаментах, мати огородження рухомих частин, справні запобіжні пристрої, заземлення та систему аварійного вимкнення [15; 16]. Дробарки, шнеки, транспортери й насоси повинні мати захисні кожухи. Забороняється експлуатація обладнання зі знятими огородженнями або несправними блокувальними пристроями.

Ферментер повинен бути обладнаний люками, запобіжною арматурою, патрубками для відведення CO_2, датчиками температури та рівня. Оскільки під час бродіння виділяється вуглекислий газ, приміщення ферментаційного відділення необхідно обладнати припливно-витяжною вентиляцією [17]. CO_2 не має запаху, може накопичуватися в нижніх частинах приміщення та створювати небезпеку задухи, тому

контроль повітряного середовища є обов’язковим.

Обладнання для дистиляції та зневоднення етанолу повинно мати теплоізоляцію гарячих поверхонь. Паропроводи, ректифікаційні колони та теплообмінники необхідно маркувати, а місця можливого контакту працівників із нагрітими поверхнями — огороджувати [14; 15].

3.4 Пожежна та вибухова безпека

Виробництво біоетанолу належить до пожежонебезпечних процесів через наявність горючої сировини, органічного пилу, спиртовмісних рідин і парів етанолу [13; 14]. Найбільш небезпечними ділянками є склад сировини, зона подрібнення, ферментаційне відділення, дистиляційна установка та склад готового біоетанолу.

Для запобігання пожежам необхідно регулярно очищати обладнання, підлогу та будівельні конструкції від пилу; не допускати накопичення лушпиння біля електродвигунів і нагрітих поверхонь; використовувати вибухозахищене електрообладнання у вибухонебезпечних зонах; забезпечити заземлення обладнання для відведення статичної електрики; обладнати приміщення автоматичною пожежною сигналізацією; розмістити первинні засоби пожежогасіння; проводити інструктажі з пожежної безпеки; заборонити використання відкритого вогню та куріння у виробничих приміщеннях [13; 14; 16].

Для складування етанолу слід використовувати герметичні ємності, розміщені у спеціально відведеній зоні. Ємності повинні бути захищені від перегрівання, механічних пошкоджень і джерел займання. У місцях можливого утворення парів спирту необхідно передбачити ефективну вентиляцію та контроль концентрації горючих парів [13; 17].

3.5 Виробнича санітарія та засоби індивідуального захисту

Для забезпечення безпечних умов праці на підприємстві необхідно підтримувати нормативний мікроклімат, достатній рівень освітленості та допустимий рівень шуму. Робочі місця операторів слід обладнувати місцевим освітленням, засобами зв’язку та зручними проходами для обслуговування обладнання.

Працівники повинні бути забезпечені такими засобами індивідуального захисту:

- спецодягом із щільної тканини;
- захисними рукавицями;
- захисними окулярами або щитками;

– респіраторами для роботи в запилених зонах;

– протишумовими навушниками;

– захисним взуттям;

– касками під час роботи біля резервуарів і вантажопідіймального обладнання.

Після завершення зміни працівники повинні проходити санітарну обробку, очищати спецодяг від пилу та залишати засоби захисту у спеціально відведених місцях. Забороняється зберігати харчові продукти у виробничих приміщеннях, де проводиться робота з пилом, реагентами або спиртовмісними рідинами.

Таблиця 3.1 — Засоби індивідуального захисту для основних дільниць виробництва

Дільниця	Небезпечна подія	Імовірність P	Тяжкість S	Ризик R	Заходи зниження ризику
Подрібнення	Пилоутворення, займання пилу	4	4	16	Аспірація, прибирання, заземлення
Гідроліз	Викид кислоти або пари	3	5	15	Герметизація, запобіжна арматура, ЗІЗ
Нейтралізація	Хімічний опік	3	4	12	Дозування реагентів, щитки, рукавиці
Ферментація	Накопичення CO_2	3	5	15	Вентиляція, газоаналізатори
Ректифікація	Опік парою або гарячою поверхнею	3	4	12	Теплоізоляція, огородження
Склад етанолу	Пожежа або вибух	2	5	10	Вибухозахист, сигналізація, заземлення

За результатами оцінки найбільш ризикованими є дільниці подрібнення, гідролізу та ферментації. Це пояснюється поєднанням пилу, високої температури, тиску, хімічних реагентів і газовиділення. Саме на цих дільницях необхідно посилити технічний контроль і забезпечити персонал додатковими засобами захисту.

3.6 Вентиляція, аспірація та контроль повітряного середовища

Ефективна вентиляція є одним із ключових заходів безпеки у виробництві біоетанолу. Вона необхідна для видалення пилу, парів реагентів, надлишкового тепла, спиртових парів і вуглекислого газу. Система вентиляції повинна поєднувати загальнообмінну та місцеву витяжну вентиляцію [8].

На дільницях приймання, подрібнення та транспортування лушпиння необхідно встановлювати аспіраційні системи. Вони повинні вловлювати пил безпосередньо в місцях його утворення: біля дробарок, пересипних вузлів, бункерів і транспортерів. Для очищення повітря доцільно використовувати циклони, рукавні фільтри або комбіновані пиловловлювачі.

У ферментаційному відділенні головним небезпечним фактором є CO_2. Вуглекислий газ важчий за повітря, тому може накопичуватися в нижніх частинах приміщень, приямках і біля резервуарів. Це створює небезпеку кисневого голодування. Тому приміщення повинні бути обладнані витяжкою з нижньої зони та сигналізаторами перевищення концентрації CO_2 [6; 8].

У зоні зберігання й перекачування етанолу необхідно контролювати вміст парів спирту в повітрі. Вентиляційне обладнання в таких приміщеннях повинно мати вибухозахищене виконання, а повітроводи мають бути заземлені для запобігання накопиченню статичної електрики [1; 2].

3.7 Вимоги до навчання та інструктажів

До роботи на технологічній лінії допускаються працівники, які пройшли медичний огляд, вступний інструктаж, первинний інструктаж на робочому місці та навчання з безпечної експлуатації обладнання. Працівники, які обслуговують ферментери, дистиляційні апарати, електрообладнання та системи подачі реагентів, повинні мати відповідну кваліфікацію.

На підприємстві необхідно проводити:

- вступний інструктаж;
- первинний інструктаж на робочому місці;
- повторний інструктаж;
- позаплановий інструктаж у разі зміни технології або обладнання;
- цільовий інструктаж під час виконання разових небезпечних робіт.

Результати інструктажів фіксують у відповідних журналах. Працівники повинні

знати порядок дій у разі пожежі, витоку етанолу, аварійного викиду CO_2, пошкодження обладнання або травмування працівника.

3.8 Дії персоналу в аварійних ситуаціях

На підприємстві повинні бути розроблені інструкції дій персоналу для основних аварійних ситуацій. До них належать пожежа, розлив кислоти, витік етанолу, аварійне підвищення тиску, зупинка вентиляції, перевищення концентрації CO_2 та травмування працівника.

Таблиця 3.3 — Алгоритм дій персоналу в аварійних ситуаціях

Аварійна ситуація	Першочергові дії	Подальші заходи
Розлив кислоти	Обмежити доступ, використати ЗІЗ, повідомити керівника зміни	Нейтралізувати, змити водою, оформити акт
Витік етанолу	Усунути джерела займання, припинити перекачування	Провітрити приміщення, зібрати розлив
Пожежа	Повідомити пожежну охорону, вимкнути обладнання	Гасити відповідними засобами, евакуювати персонал
Перевищення CO_2	Вивести людей із зони, увімкнути вентиляцію	Провести контроль повітря перед поверненням
Підвищення тиску	Зупинити подачу пари/реагенту	Скинути тиск через запобіжну систему
Травмування	Надати першу допомогу	Викликати медичну службу, повідомити відповідальних осіб

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Мета техніко-економічного обґрунтування

Метою техніко-економічного розділу є визначення доцільності впровадження технологічної лінії з переробки соняшникового лушпиння на біоетанол. Економічна ефективність такого рішення формується за рахунок використання дешевої відходної сировини, одержання паливного біоетанолу, можливості реалізації або утилізації побічних продуктів, а також зменшення витрат на поводження з відходами олійно-жирового виробництва.

У розрахунках приймається, що добова продуктивність становить 25 т біоетанолу. Робота підприємства передбачається протягом 300 діб на рік.

4.2 Річна продуктивність виробництва

Річна кількість біоетанолу визначається за формулою:

$$Q_{\text{річ}} = Q_{\text{доб}} \cdot D \tag{4.1}$$

де $Q_{\text{річ}}$ — річний випуск біоетанолу, т/рік;

$Q_{\text{доб}}$ — добова продуктивність, т/добу;

D — кількість робочих діб на рік.

$$Q_{\text{річ}} = 25 \cdot 300 = 7500 \text{ т/рік}$$

Отже, за прийнятого режиму роботи підприємство може виробляти приблизно 7500 т біоетанолу на рік.

4.3 Розрахунок матеріальних витрат

Для оцінки матеріальних витрат використано дані матеріального балансу. Оскільки баланс у вихідному матеріалі наведено на 20 л біоетанолу, його можна використовувати як базу для порівняння витрат сировини, реагентів, води, пари та побічних продуктів.

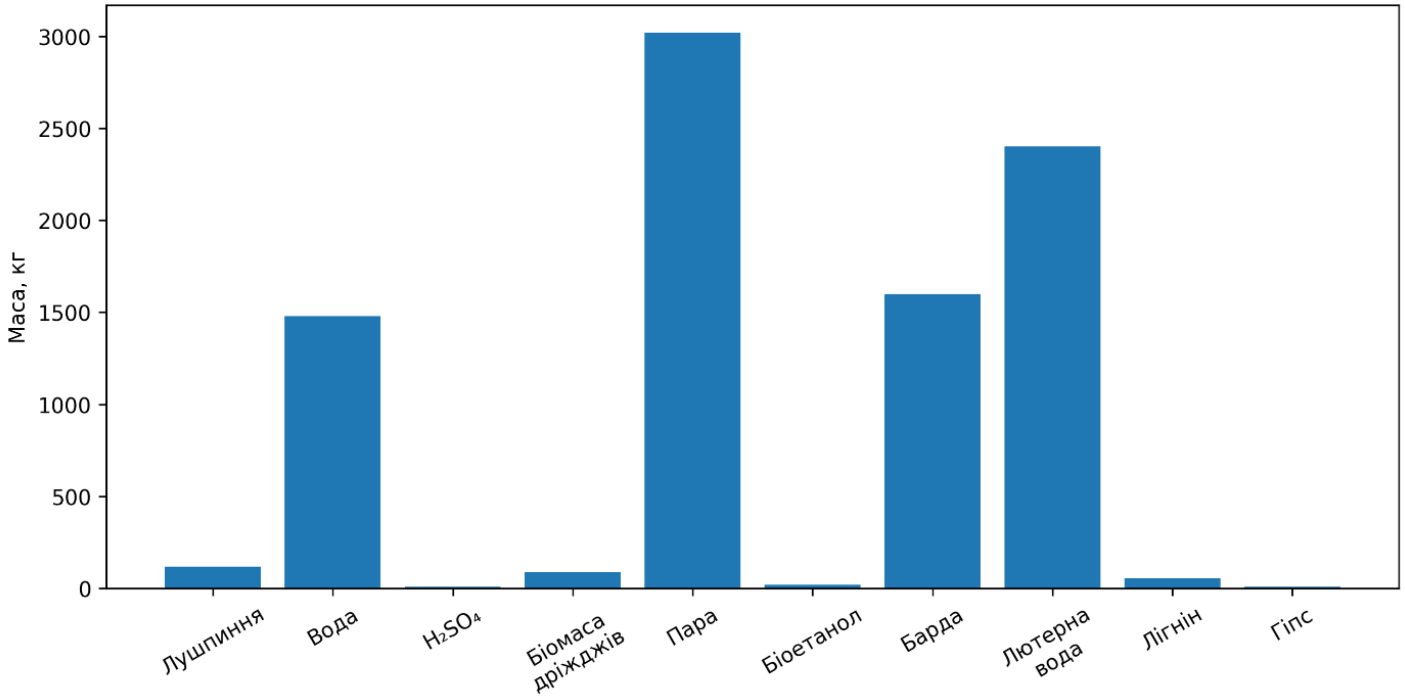


Рисунок 4.1 — Основні матеріальні потоки процесу на 20 л біоетанолу

Таблиця 4.1 — Орієнтовна структура матеріальних потоків

Матеріальний потік	Кількість на 20 л біоетанолу, кг	Економічне значення
Соняшникове лушпиння	120,0	Основна сировина
Сірчана кислота	9,0	Реагент для гідролізу
Вода	1480,0	Технологічне середовище
Біомаса дріжджів	89,48	Біологічний агент
Гостра пара	3017,4	Основна енергетична витрата
Біоетанол	20,0	Основний товарний продукт
Барда	1600,0	Може бути використана після переробки
Лігнін	56,0	Можливий енергетичний або хімічний ресурс
Гіпс	10,2	Побічний осад після нейтралізації

З графіка видно, що найбільшу частку серед матеріальних потоків становлять гостра пара, лютерна вода, барда та вода. Це свідчить про те, що економічна ефективність виробництва значною мірою залежить від енергозбереження, повторного використання води та раціональної утилізації побічних продуктів.

4.4 Орієнтовна структура експлуатаційних витрат

До складу експлуатаційних витрат входять витрати на сировину, реагенти, енергію,

пару, заробітну плату, амортизацію обладнання, ремонт, водопостачання, утилізацію відходів і допоміжні матеріали.

Таблиця 4.2 — Орієнтовна структура експлуатаційних витрат

Стаття витрат	Частка, %	Пояснення
Сировина	28	Заготівля, доставка та підготовка лушпиння
Кислота та реагенти	12	H_2SO_4, вапняне молоко, мінеральні солі
Пара й електроенергія	32	Гідроліз, випарювання, ректифікація
Заробітна плата	10	Оплата праці основного й допоміжного персоналу
Амортизація	11	Знос обладнання та споруд
Інші витрати	7	Ремонт, вода, лабораторний контроль, утилізація

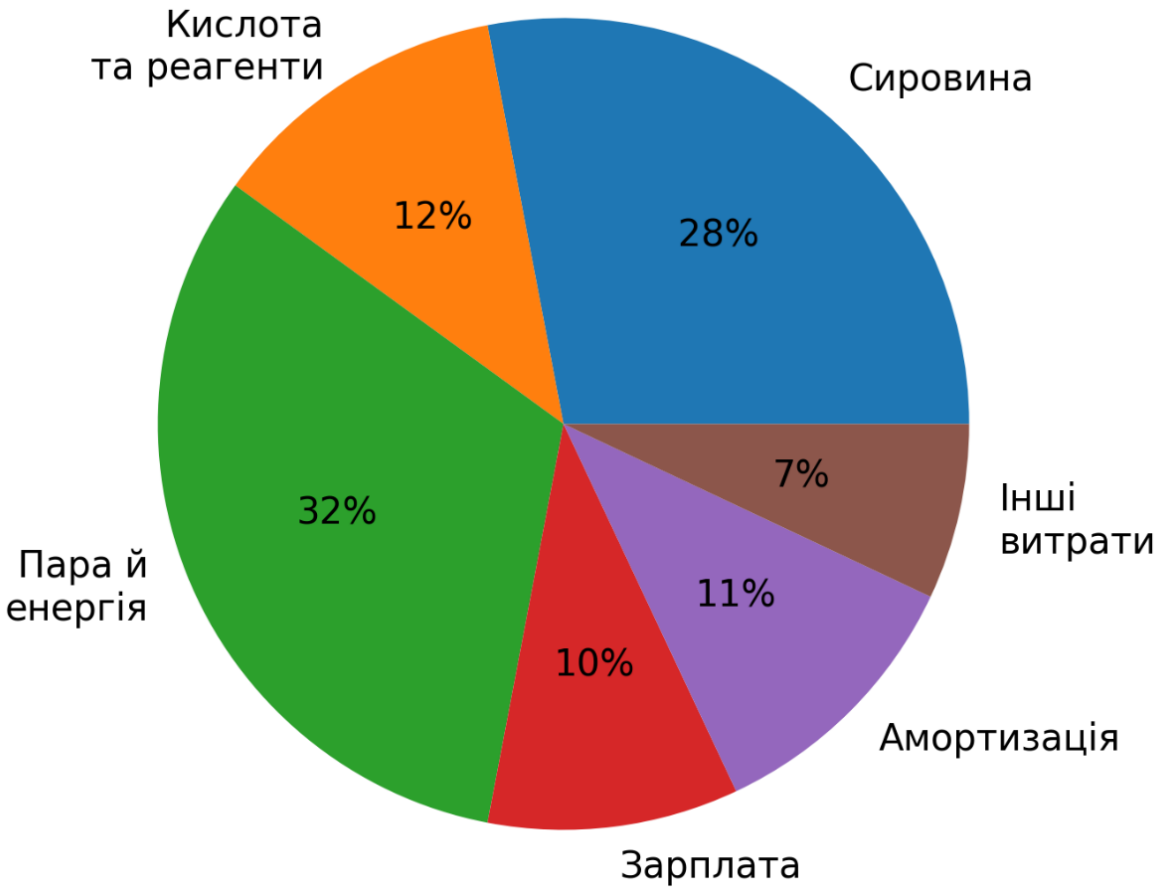


Рисунок 4.2 — Орієнтовна структура експлуатаційних витрат

Найбільшу частку витрат становлять пара та енергія. Це пояснюється тим, що виробництво біоетанолу з лігноцелюлозної сировини потребує високотемпературного гідролізу, випарювання гідролізату та ректифікації бражки. Тому одним із головних напрямів зниження собівартості є використання вторинної теплоти, теплообмінників-

рекуператорів і часткова рециркуляція технологічної води.

4.5 Розрахунок річного економічного ефекту

Для орієнтовного розрахунку приймаємо такі умовні вихідні дані:

Таблиця 4.3 — Вихідні дані для економічного розрахунку

Показник	Позначення	Значення
Добова продуктивність	$Q_{\text{доб}}$	25 т/добу
Кількість робочих діб	D	300 діб
Річний випуск	$Q_{\text{річ}}$	7500 т/рік
Орієнтовна ціна реалізації біоетанолу	Ц	42000 грн/т
Орієнтовна собівартість	С	37500 грн/т
Капітальні вкладення	K	12,0 млн грн

Річний дохід від реалізації продукції:

$$\text{Д} = Q_{\text{річ}} \cdot \text{Ц} \tag{4.2}$$

$$\text{Д} = 7500 \cdot 42000 = 315000000 \text{ грн}$$

Річні виробничі витрати:

$$\text{В} = Q_{\text{річ}} \cdot \text{С} \tag{4.3}$$

$$\text{В} = 7500 \cdot 37500 = 281250000 \text{ грн}$$

Орієнтовний прибуток:

$$\text{П} = \text{Д} - \text{В} \tag{4.4}$$

$$\text{П} = 315000000 - 281250000 = 33750000 \text{ грн}$$

З урахуванням податків, витрат на ремонт, резервних витрат, логістики, сезонності постачання сировини та можливих простоїв приймаємо чистий річний економічний ефект на рівні: $\text{Е}_{\text{ч}} = 3{,}4$ млн грн/рік

4.6 Розрахунок строку окупності

Строк окупності визначається за формулою:

$$T = K / E_{\text{ч}} \tag{4.5}$$

де T — строк окупності, років;

K — капітальні вкладення, млн грн;

$E_ч$ — чистий річний економічний ефект, млн грн/рік.

$$T = 12{,}0/3{,}4 = 3{,}53 \text{ року}$$

Отже, орієнтовний строк окупності проєкту становить 3,5 року.

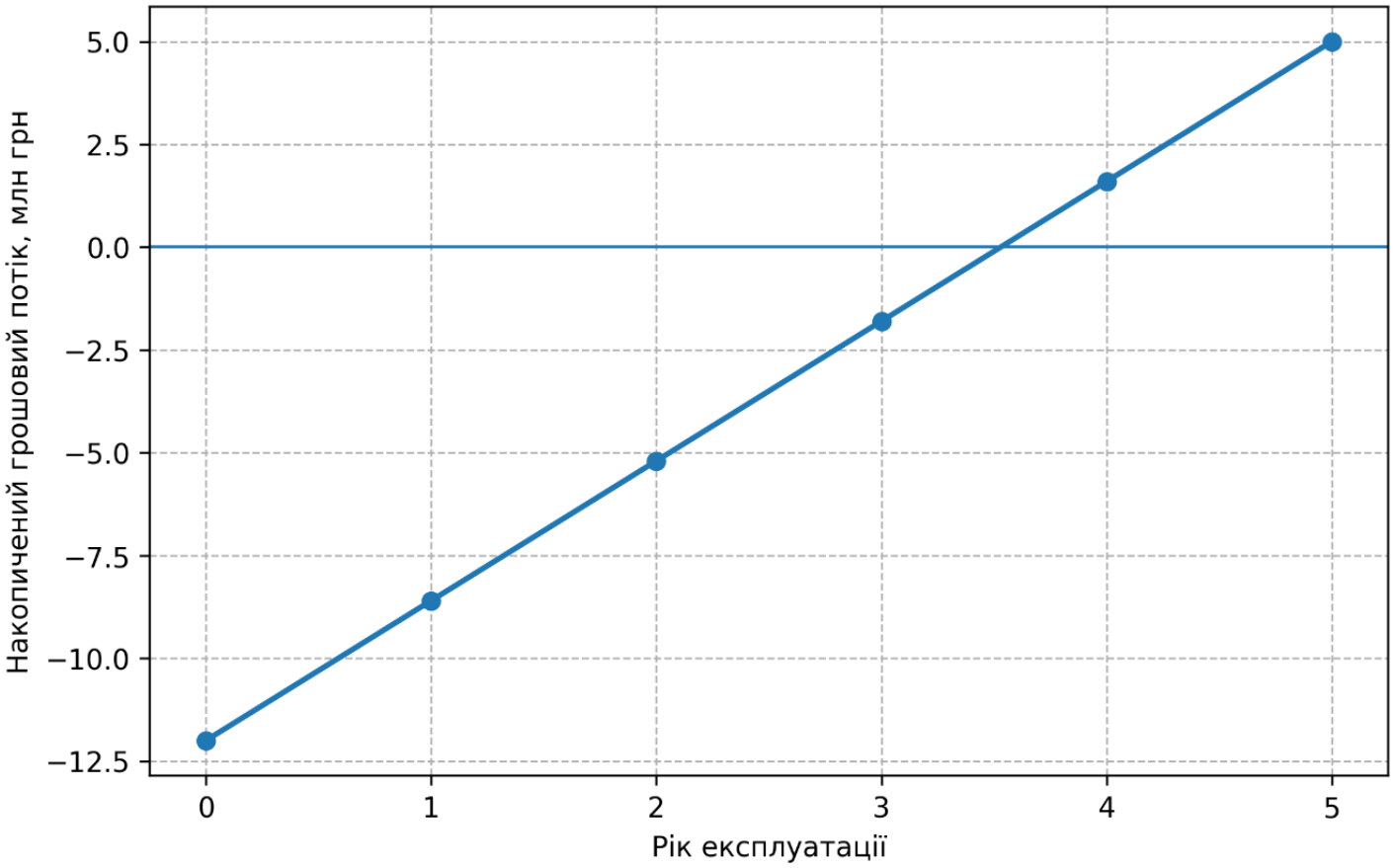


Рисунок 4.3 — Орієнтовна динаміка окупності проєкту

4.7 Порівняння базового та запропонованого варіантів

Таблиця 4.4 — Порівняння базового й удосконаленого варіантів

Показник	Базовий варіант	Запропонований варіант	Результат
Використання лушпиння	Спалювання або складування	Переробка на біоетанол	Зростання доданої вартості
Режим ферментації	Періодичний	Безперервний з рециркуляцією	Підвищення продуктивності
Використання дріжджів	Одноразове або часткове	Повернення через сепаратор	Зниження витрат
Побічні продукти	Частково утилізуються	Лігнін, барда, фурфурол, сивушні масла	Комплексна переробка
Енергетична ефективність	Без рекуперації	Використання вторинної теплоти	Менші витрати пари
Орієнтовна окупність	Понад 5 років	3,5 року	Економічно доцільно

Встановлено, що впровадження технології переробки соняшникового лушпиння на біоетанол є доцільним за умови комплексного використання сировини, побічних продуктів і вторинної теплоти. Річний випуск біоетанолу за продуктивності 25 т/добу та 300 робочих діб становить 7500 т/рік.

Найбільший вплив на собівартість продукції мають витрати на пару, електроенергію, сировину та реагенти. Запропоноване використання безперервної ферментації з рециркуляцією дріжджів дає змогу зменшити витрати на біологічний агент і підвищити стабільність процесу. Орієнтовний чистий річний економічний ефект становить 3,4 млн грн, а строк окупності капітальних вкладень — близько 3,5 року.

Таким чином, запропонована технологія має технічну, енергетичну й економічну доцільність, оскільки дає змогу перетворити відходи соняшникового виробництва на товарний паливний продукт і зменшити екологічне навантаження підприємства.

ВИСНОВОК

У дипломній роботі було розглянуто питання розробки технологічного процесу переробки соняшникового лушпиння на біоетанол з обґрунтуванням конструкційних параметрів основного обладнання. Актуальність обраної теми зумовлена необхідністю раціонального використання побічних продуктів олійно-жирового виробництва, зменшенням кількості органічних відходів та підвищенням енергетичної незалежності підприємств за рахунок одержання альтернативного рідкого палива.

У першому розділі проаналізовано технологічні особливості використання соняшникового лушпиння як лігноцелюлозної сировини. Встановлено, що основними компонентами лушпиння є целюлоза, геміцелюлоза та лігнін. Саме целюлозна і геміцелюлозна частини можуть бути джерелом ферментованих цукрів, однак наявність лігніну ускладнює їх доступність для біохімічного перетворення. Тому обов’язковими стадіями технологічного процесу є очищення, подрібнення, попередня фізико-хімічна обробка, гідроліз, нейтралізація, ферментація, дистиляція та зневоднення етанолу.

Обґрунтовано, що для підвищення ефективності гідролізу доцільно подрібнювати соняшникове лушпиння до фракції 3–5 мм. Такий розмір частинок забезпечує достатню площу контакту сировини з реагентами, сприяє кращому проникненню кислоти у структуру матеріалу та водночас не створює надмірного пилоутворення. Порівняльний аналіз способів попередньої обробки показав, що для умов проєктованої лінії найбільш доцільною є кислотна або комбінована обробка. Кислотний гідроліз є технологічно простішим, а комбінований варіант може бути перспективним для подальшої модернізації виробництва.

У конструкторсько-технологічному розділі запропоновано технологічну схему переробки соняшникового лушпиння, яка включає приймання сировини, очищення, подрібнення, кислотний гідроліз, випарювання та нейтралізацію гідролізату, ферментацію, сепарацію дріжджів, брагоректифікацію і отримання паливного біоетанолу. Як основне обладнання розглянуто гідролізатапарат перколяційного типу та ферментер для спиртового бродіння. Для гідролізатапарата обґрунтовано необхідність кислотостійкого футерування, оскільки процес відбувається за підвищеної температури, тиску та в кислому середовищі.

У роботі визначено основні параметри ферментаційного обладнання. Ферментер повинен забезпечувати стабільну температуру бродіння, перемішування середовища,

відведення вуглекислого газу, санітарну обробку та контроль технологічних показників. Використання безперервного режиму ферментації з рециркуляцією дріжджової біомаси дає змогу підвищити продуктивність процесу, зменшити витрати на культуру мікроорганізмів і забезпечити стабільніше накопичення етанолу.

У розділі охорони праці розглянуто основні небезпечні та шкідливі фактори, які можуть виникати під час експлуатації технологічної лінії. До них належать дія підвищеної температури і тиску, небезпека контакту з кислотами, утворення пилу під час подрібнення лушпиння, можливість виділення вуглекислого газу під час ферментації, небезпека займання спиртовмісних парів та ризики, пов’язані з експлуатацією електрообладнання. Запропоновані заходи безпеки передбачають герметизацію апаратів, використання контрольно-вимірювальних приладів, вентиляції, засобів індивідуального захисту, пожежної сигналізації та дотримання технологічних регламентів.

У техніко-економічній частині обґрунтовано доцільність впровадження запропонованої технології. Переробка соняшникового лушпиння на біоетанол дає змогу підвищити додану вартість побічного продукту, зменшити витрати на утилізацію відходів, отримати додатковий енергетичний ресурс та використовувати побічні продукти процесу, зокрема лігніновий залишок і барду. Запропонована технологія є перспективною для підприємств, які мають стабільну сировинну базу та зацікавлені у впровадженні енергоефективних і ресурсозберігаючих рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Калетнік Г. М. Біопалива: ефективність їх виробництва та споживання в АПК України. Київ : Аграрна наука, 2010. 327 с.

2. Гелетуха Г. Г., Желєзна Т. А. Перспективи використання біомаси для виробництва енергії в Україні. Київ : Інститут технічної теплофізики НАН України, 2019. 38 с.

3. Дубровін В. О., Мельничук М. Д., Мироненко В. Г. Біоенергетика в Україні: стан та перспективи розвитку. Київ : НУБіП України, 2015. 176 с.

4. Блюм Я. Б., Гелетуха Г. Г., Григорюк І. П. Новітні технології біоенергоконверсії. Київ : Аграр Медіа Груп, 2010. 326 с.

5. Роїк М. В., Гументик М. Я., Мамайсур В. В. Біоенергетичні культури та біопаливо. Київ : Компринт, 2013. 354 с.

6. Снєжкін Ю. Ф., Петрова Ж. О. Тепломасообмінні процеси під час переробки рослинної сировини. Київ : Наукова думка, 2017. 284 с.

7. Технологія спирту : підручник / В. О. Маринченко, В. А. Домарецький, П. Л. Шиян та ін. Вінниця : Поділля-2000, 2003. 496 с.

8. Шиян П. Л., Сосницький В. В., Олійнічук С. Т. Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика. Київ : Асканія, 2009. 424 с.

9. Кравчук В. І., Грицишин М. І., Коваль С. М. Сучасні технології переробки рослинної сировини. Київ : УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2016. 212 с.

10. ДСТУ 7166:2010. Біоетанол паливний. Технічні умови. Київ : Держспоживстандарт України, 2011. 18 с.

11. ДСТУ 3768:2019. Пшениця. Технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 18 с.

12. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 30 с.

13. ДНАОП 0.00-1.28-10. Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском. Київ : Міністерство соціальної політики України, 2010.

14. НПАОП 0.00-1.81-18. Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском. Київ : Міністерство соціальної політики України, 2018.

15. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. Київ : МВС України, 2014.

16. Sun Y., Cheng J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a

review. Bioresource Technology. 2002. Vol. 83, No. 1. P. 1–11.

17. Mosier N., Wyman C., Dale B., Elander R., Lee Y. Y., Holtzapple M., Ladisch M. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. Bioresource Technology. 2005. Vol. 96, No. 6. P. 673–686.

18. Hendriks A. T. W. M., Zeeman G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. Bioresource Technology. 2009. Vol. 100, No. 1. P. 10–18.

19. Balat M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: a review. Energy Conversion and Management. 2011. Vol. 52, No. 2. P. 858–875.

20. Zabed H., Sahu J. N., Suely A., Boyce A. N., Faruq G. Bioethanol production from renewable sources: current perspectives and technological progress. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 71. P. 475–501.