

**Львівський національний університет ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С.З. Гжицького**

Факультет харчових технологій та біотехнологій

(повна назва факультету)

Кафедра біотехнологій та радіології

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістр

**на тему: “Удосконалення окремих ланок технологічного
процесу виробництва біоетанолу”**

Виконав: студент 2 курсу, групи 1
спеціальності

G 21 «Біотехнологія та біоінженерія»
за ОПП «Біотехнологія та біоенергетика»

Ризік Ростислав Тарасович

(прізвище та ініціали)

Керівники: **проф. Буцяк В.І., Музика В.П.**

(прізвище та ініціали)

Рецензент: **Філіпшов С.І., директор ТЗВ “БІТ”**

(прізвище та ініціали)

Кваліфікаційну роботу магістра розглянуто на попередньому захисті,
протокол № від 2025 р. Допуск до захисту даної роботи в
Екзаменаційній комісії рекомендовано.

Завідувач кафедри, проф.

Василь БУЦЯК

Львів – 2025

Львівський національний університет ветеринарної медицини та
біотехнологій імені С.З. Гжицького
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення факультет харчових технологій та
біотехнологій

Кафедра, циклова комісія кафедра біотехнологій та радіології

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

(шифр і назва)

Спеціальність G 21 «Біотехнології та біоінженерія»

ОПП Біотехнології та біоенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри, голова

циклової комісії В.І.Буцяк

“ ” 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ**

Ризіка Ростислава Тарасовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи “Удосконалення окремих ланок технологічного процесу виробництва біоетанолу”

Керівник магістерської роботи

Буцяк Василь Іванович, професор,

Музика Віктор Павлович, професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 20 06 2025 року №497-4

2. Строк подання магістерської роботи 18.11.2025 року

3. Вихідні дані до магістерської роботи

Вихідні матеріали до виконання роботи: біоетанол, раси дріжджових клітин, м'яса, м'ясне сусло, біопалива II покоління, поживне середовище, анаеробна ферментація, культивування, технологічний процес, апаратурне забезпечення.

4. Зміст магістерської роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

вступ, огляд літератури, матеріал та методи досліджень, результати власних досліджень, висновки та пропозиції, додатки, список використаної літератури.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) графіки, діаграми, рисунки, технологічні схеми, технологічні лінії), рисунки: покоління біопалива (біоетанолу) залежно від сировини його одержання,

основні джерела лігноцелюлози, найбільш вживана сільськогосподарська сировина як субстрат для ферментації в процесі одержання біоетанолу, сировина 2 покоління для виробництва біоетанолу, Технологічний процес виробництва етилового спирту із кукурудзи, технологічні режими ферментації субстратів для отримання біоетанолу, метаболічний цикл перетворення моноцукрів у етиловий спирт, використання меляси в різних галузях економіки.

Схеми: принципова схема виробництва технічного етилового спирту із лігноцелюлозного субстрату, схема перетворення цукрози залежно від активного водно-кислого та водно-лужного середовища, концептуальна технологічна схема одержання біоетанолу за використанням як субстрату для ферментації – меляси, порівняльна характеристика безвідходного виробництва етилового спирту із використанням різних субстратів, блок-схема технології одержання біоетанолу, схема установки для виробництва спирту-сирцю шляхом перегонки.

6. Консультанти розділів магістерської роботи

Розділ	Консультант ПІБ, посада	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1.Літературний огляд.	проф. Буцяк В.І.		
2.Методика експерименту та основні методи досліджень.	проф. Музика В.П.		
3.Експериментальна частина.	проф. Буцяк В.І.		
5.Висновки та пропозиції	проф. Буцяк В.І.		

7. Дата видачі завдання 10.09.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання	примітка
1.	Літературний огляд.		
	I атестація:	06.10.25р.	30%
2.	Методика експерименту та основні методи досліджень.		20%
3.	Експериментальна частина.		35%
	II атестація:	07.11.25р.	55%
5.	Висновки та пропозиції		5%
	III атестація:	18.11.25р.	15%
	Допущено до захисту.	10.12.25р.	100%

Здобувач

_____ **Ростислав РИЗІК**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник магістерської роботи

_____ **Василь БУЦЯК**
_____ **Віктор МУЗИКА**
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	5
АНОТАЦІЯ	6
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	11
1.1. Історичні аспекти та сучасні тенденції виробництва біоетанолу	11
1.1.2. Класифікація сировини для виробництва біоетанолу	17
1.2. Основні етапи технологічного процесу виробництва біоетанолу	21
1.3. Вдосконалення окремих ланок технологічного процесу виробництва біоетанолу	24
1.3.1. Інноваційні технології в виробництві етилового спирту	27
РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	30
2.1. Біохімізм процесу одержання біоетанолу	30
2.2. Матеріал і методи дослідження	33
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	35
3.1. Основні стадії технологічного процесу одержання біоетанолу із меляси	35
3.1.1. Матеріальні затрати для виробництва етилового спирту із м'ясного субстрату	44
3.2. Оптимізація технологічному процесу виробництва етилового спирту із м'ясного субстрату	46
3.3. Екологічна та економічна ефективність щодо удосконалених процесів виробництва біоетанолу	54
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	64
ДОДАТКИ	69

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AЗ – анаеробне зброджування;

БАР – біологічно активні речовини;

СР – суха речовина;

SSF – одночасна сахаризація та ферментація;

SSCF – одночасна коваріяція гідролізу і ферментації;

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота написана на 71 сторінці. Вона складається із вступу та основних розділів: огляд літератури, матеріал і методи досліджень, результати власних досліджень, висновків та пропозицій, додатків, списку джерел літератури, що містить 45 джерел. Містить 16 рисунків, 8 таблиць та 3 додатки.

Ключові слова: біоетанол, раси дріжджових клітин, меляса, мелясне сусло, біопалива II покоління, поживне середовище, анаеробна ферментація, культивування, технологічний процес, апаратурне забезпечення.

Кваліфікаційна робота на тему: “Удосконалення окремих ланок технологічного процесу виробництва біоетанолу” сконцентрована на питаннях розвитку відновлюваних джерел енергії, зокрема на біопаливі. Серед рідких біопалив, біоетанол посідає чільне місце завдяки своїй високій екологічній безпеці, технологічній адаптивності та потенціалу до широкого використання у транспортному секторі. Біоетанол є продуктом мікробіологічного бродіння вуглеводневої сировини, і його промислове виробництво розглядається як перспективний напрям зменшення залежності від викопних палив.

У роботі було розглянуто комплекс питань, що стосуються сировинної бази, технологічних процесів виробництва біоетанолу, а також інноваційних підходів до вдосконалення окремих ланок технологічного циклу. Одним з основних викликів, що постають перед виробництвом біоетанолу, є забезпечення доступності та ефективного використання сировини. Сучасні тенденції свідчать про значне розширення спектру сировинних ресурсів – від традиційних зернових культур до неперетравних лігноцелюлозних матеріалів, таких як солома, деревина та аграрні відходи. Це дає змогу мінімізувати конкуренцію з продовольчим сектором, знижує вартість палива і підвищує екологічну безпеку виробництва.

Об'єкт дослідження – базовий субстрат (меляса) – побічний продукт виробництва цукру, мелясне сусло, популяція дріжджових рас, проферментована бражка та дистилят.

Предмет дослідження – оптимізація технологічного процесу виробництва біоетанолу на мелясному суслі.

Метою роботи – обґрунтувати сучасні підходи до вдосконалення окремих етапів технологічного процесу безвідходного виробництва біоетанолу на відходах виробництва цукру – мелясі.

Для вирішення контексту даної проблеми поставлені наступні **завдання:**

- проаналізувати літературні джерела про сировинний потенціал та мікроорганізмів-продуцентів біоетанолу і сучасний стан безвідходних технологій одержання біопалива II покоління;
- охарактеризувати історичні аспекти та сучасні тенденції виробництва біоетанолу, основні етапи технологічного процесу та інноваційні підходи до виробництва етилового спирту;
- ознайомитись із особливостями біосинтезу етилового спирту на мелясному суслі та виокремити основні параметри, що потребують оптимізації;
- подати опис основних стадії технологічного процесу одержання етилового спирту на мелясному субстраті та розрахувати матеріальні затрати цього виробництва;
- дослідити ефективність альтернативних технологічних рішень та оцінити екологічний та економічний ефект від удосконалення процесу виробництва біопалива;

- сформулювати рекомендації щодо впровадження оптимізованих ланок та параметрів технології виробництва біоетанолу.

Актуальність теми. Україна, як аграрна держава, має значний потенціал у розвитку виробництва біоетанолу. Розвинена сільськогосподарська інфраструктура, велика кількість залишкової біомаси (солома, кукурудзяні стебла, буряковий жом, лушпиння), наукові розробки у сфері мікробіології та хімії дають змогу впроваджувати високотехнологічне біопаливне виробництво. Однак для цього необхідно системно підходити до удосконалення технологічних етапів виробництва, включаючи локалізацію обладнання, підготовку кадрів, розробку державних програм підтримки, а також проведення ґрунтовних досліджень.

Зі зростанням попиту на відновлювані джерела енергії актуальним напрямком є інновації у виробництві біоетанолу, що стали критично важливими для підвищення ефективності, зменшення собівартості продукції та зниження екологічного навантаження. Удосконалення існуючих та розробка нових технологій дозволяє переходити від традиційного виробництва першого покоління до більш стійких і рентабельних підходів другого і третього покоління.

Науковий внесок роботи. Після ферментації мелясного суслу, яке було додатково балансоване Нітратними та Фосфатними елементами живлення із додаванням ростових факторів, ми спостерігаємо значний приріст в ньому етилового спирту. За таких умов, коли продуценти забезпечені необхідними елементами живлення, синтез етанолу зріс у 1,95 рази із 5,75 %об до 11,25 %об, окрім того значно знизився вміст загальних цукрів до 0,42 г/100 см³, що на 48,8% є вищим за контроль.

Практична цінність роботи. Перспективи розвитку виробництва біоетанолу пов'язані з подальшим впровадженням багатокомпонентних

біотехнологій, застосуванням альтернативних видів сировини, оптимізацією технологічних режимів та підвищенням автоматизації. Такий комплексний підхід забезпечить конкурентоспроможність біоетанолу на світовому ринку та сприятиме переходу до стійкої і «зеленої» економіки.

ВСТУП

У сучасному світі стрімко зростає потреба у забезпеченні енергетичної безпеки, зменшенні залежності від викопних палив і протидії глобальним змінам клімату. Традиційні джерела енергії, такі як вугілля, нафта і природний газ, з одного боку, є обмеженими та виснаженими ресурсами, а з іншого – основними джерелами викидів парникових газів. Це вимагає глобального переходу до використання альтернативних, сталих джерел енергії, серед яких біоетанол займає особливе місце як один із найпоширеніших видів рідкого біопалива [1].

Біоетанол – це спирт, отриманий шляхом ферментації цукрів, що містяться в біомасі, зокрема сировині рослинного походження. Його застосування як добавки до бензину або як самостійного пального сприяє зменшенню викидів вуглекислого газу, покращує якість повітря в містах, знижує імпорт нафтопродуктів і активізує розвиток сільськогосподарських регіонів. Завдяки цим перевагам виробництво біоетанолу розглядається як ключова стратегія енергетичного переходу в багатьох країнах світу, зокрема в країнах ЄС, США, Бразилії, Китаї та Україні [2].

Водночас технологія виробництва біоетанолу має низку технологічних, економічних та екологічних викликів, зокрема складність переробки лігноцелюлозної сировини, потребу у великих обсягах води та енергії, обмеження у ферментативному розщепленні целюлози й геміцелюлози, а також значні витрати на очистку та концентрування етанолу. Це зумовлює необхідність постійного удосконалення окремих ланок виробничого процесу, що дає змогу підвищити ефективність, знизити собівартість продукту та мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Окрема увага приділяється енергетичному балансу біоетанольного виробництва. Технології повинні не тільки забезпечувати високий вихід етанолу, а й економно витрачати ресурси, мати можливість рециклінгу

побічних потоків, впроваджувати утилізацію залишкової біомаси або її використання як добрив чи джерела енергії [3].

Сучасна наука і практика демонструють чимало рішень, що дозволяють підвищити ефективність заводів із виробництва біоетанолу. Це, зокрема, впровадження багатостадійних реакторів, застосування мембранної технології, перехід до інтегрованих біорефінерій, які поряд із біоетанолом продукують біогаз, біопластики, білки, добрива [4].

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Історичні аспекти та сучасні тенденції виробництва біоетанолу

У контексті глобальної енергетичної кризи та зміни клімату, все більше науковців, промисловців і політиків зосереджують увагу на розробку, використання та вдосконалення існуючих технологій щодо виробництва відновлювальних джерел енергій і, зокрема, біоетанолу – етиловий спирт для технічного використання.

Перші спроби отримання спирту для технічних і енергетичних цілей сягають ще XVIII століття. Проте промислове виробництво біоетанолу в якості моторного пального почалося лише в XX столітті, зокрема в Бразилії в 1970-х роках у відповідь на нафтову кризу. Нині лідерами з виробництва біоетанолу є США, Бразилія, Китай, Європейський Союз.

За даними International Energy Agency (IEA, 2023), у 2022 році світове виробництво біоетанолу склало понад 100 мільярдів літрів. Очікується, що до 2030 року ця цифра може зрости на 30–40%, зважаючи на збільшення попиту на відновлюване пальне та зростання транспортного сектору.

У літературі прийнято класифікувати біоетанол за поколіннями залежно від типу сировини [5]:

- біоетанол першого покоління виробляється з харчової сировини (цукровий очерет, кукурудза, пшениця, ячмінь), що створює етичні суперечки щодо конкуренції з харчовими потребами.
- біоетанол другого покоління базується на лігноцелюлозній сировині: солома, деревина, рослинні залишки.
- біоетанол третього покоління отримують з мікроводоростей і інших біомас, що не конкурують із харчовою галуззю (рис. 1.1).

Сучасні дослідження дедалі більше спрямовані на оптимізацію технологій саме другого і третього покоління, що дозволяє використовувати відходи та нетрадиційні джерела біомаси, знижуючи вплив на продовольчу безпеку (Demirbas, 2019; Zhang et al., 2021).

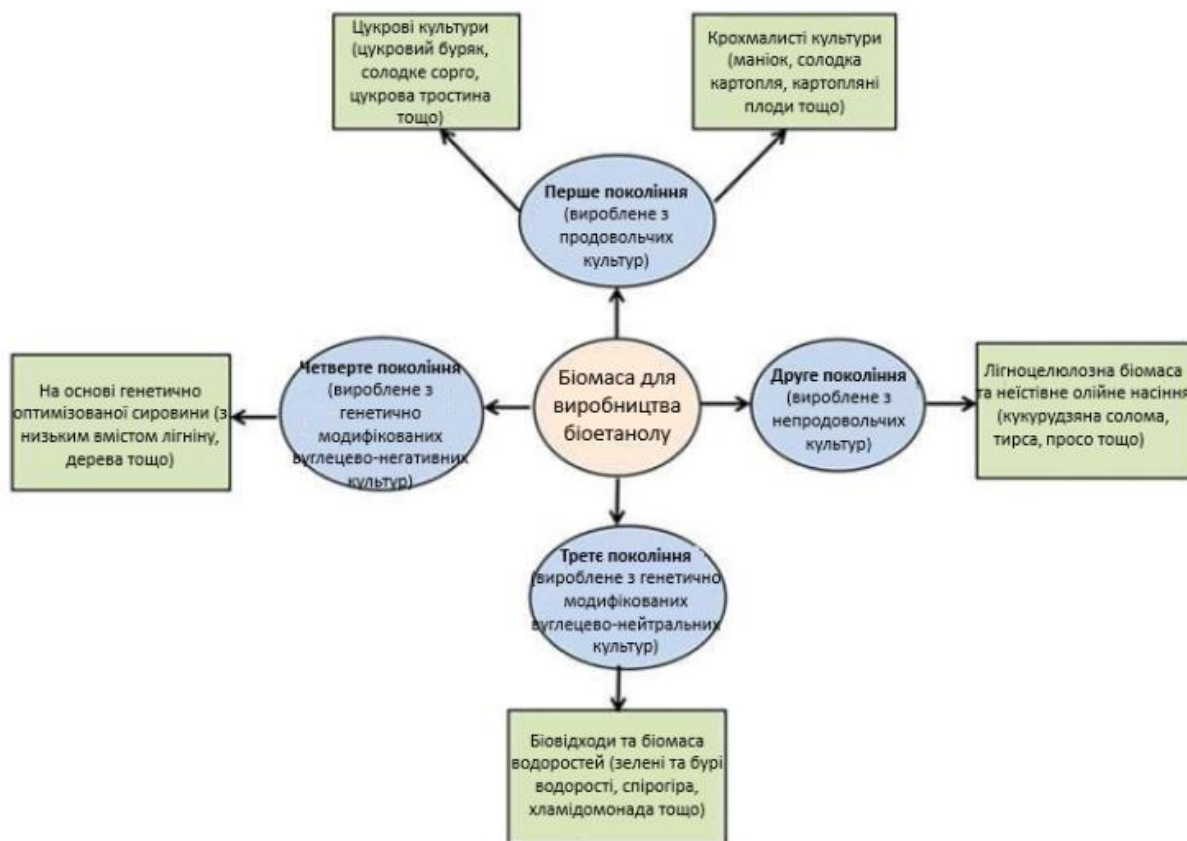


Рис. 1.1. Покоління біопалива (біоетанолу) залежно від сировини його одержання [6].

В основі виробництва біоетанолу лежить процес ферментації цукрів мікроорганізмами, найчастіше – дріжджами *Saccharomyces cerevisiae*. При цьому важливо забезпечити високу ефективність гідролізу, ферментації та відбору кінцевого продукту. Значну частину наукових досліджень присвячено [7]:

- удосконаленню попередньої обробки біомаси (кислотний, лужний, термічний гідроліз, іонізація, амоніачна вибухова деструкція тощо) (Mosier et al., 2005; Sun & Cheng, 2002);
- модифікації штамів мікроорганізмів для поліпшеного засвоєння різних типів цукрів, особливо пентоз (xylose, arabinose), які утворюються при розкладі геміцелюлози (Hahn-Hägerdal et al., 2007);
- багатостадійним процесам гідролізу й ферментації (SSF – simultaneous saccharification and fermentation; SHF – separate hydrolysis and

fermentation), які зменшують енергоспоживання і скорочують тривалість виробництва.

У вітчизняній та закордонній науково-технічній літературі окрему увагу приділено критичним етапам технології, які є «вузькими місцями» процесу: гідроліз лігноцелюлози: потребує значних енерговитрат та утворює інгібітори ферментації (рис.1.2).



Принципова схема виробництва технічного етилового спирту із лігноцелюлозного субстрату [8].

Ферментація пентоз: більшість класичних штамів не можуть ефективно перетворювати пентози у біоетанол. Відбір етанолу: традиційна дистиляція – енергозатратна операція, і тому досліджується застосування мембранних технологій, первапорації, надкритичних рідин.

Праці таких авторів, як Taherzadeh & Karimi (2007), Zaldivar et al. (2001) та Wuman (2007), узагальнюють найновіші підходи до вдосконалення саме цих ключових етапів.

В Україні перспективи біоетанольної галузі значною мірою залежать від аграрного потенціалу, наявності великої кількості відходів сільського господарства та харчової промисловості. За даними Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, щорічний потенціал лігноцелюлозної біомаси становить понад 25 млн тонн, з яких лише невелика частина утилізується (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Основні джерела лігноцелюлози [9].

У працях О. Г. Рубана, Ю. П. Лебедева, Н. П. Алієвої розглядаються варіанти адаптації західних технологій до українських реалій, зокрема щодо виробництва біоетанолу з кукурудзяного стебла, соняшникового лушпиння, пшеничної соломи.

Огляд літератури свідчить про постійний науково-технологічний прогрес у сфері виробництва біоетанолу. Найбільший потенціал для удосконалення має: етап підготовки сировини (зменшення токсичних продуктів при гідролізі); генетична інженерія штамів для ефективної ферментації всіх видів цукрів; технології енергозберігаючого відбору етанолу.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на інтеграцію процесів, скорочення енергоспоживання, адаптацію до локальної сировини та підвищення економічної доцільності підприємств із виробництва біоетанолу [10].

Удосконалення цих ланок включає в себе як інженерно-технологічні інновації, так і впровадження нових біокаталізаторів, ферментних композицій, генетично модифікованих мікроорганізмів, а також систем інтеграції процесів (наприклад, SSF або SSCF).

1.1.2. Класифікація сировини для виробництва біоетанолу

Умовно сировину поділяють на три основні групи:

Сировина першого покоління (харчова): зернові культури (пшениця, кукурудза, ячмінь, сорго), цукровмісні культури (цукрова тростина, цукрові буряки), плоди і соковиті культури (маніока, тропічні фрукти).

Ця сировина має високий вміст крохмалю або сахарози, легко піддається гідролізу та ферментації, але створює конкуренцію з продовольчим сектором, що викликає етичні та економічні суперечки (рис. 1.4).

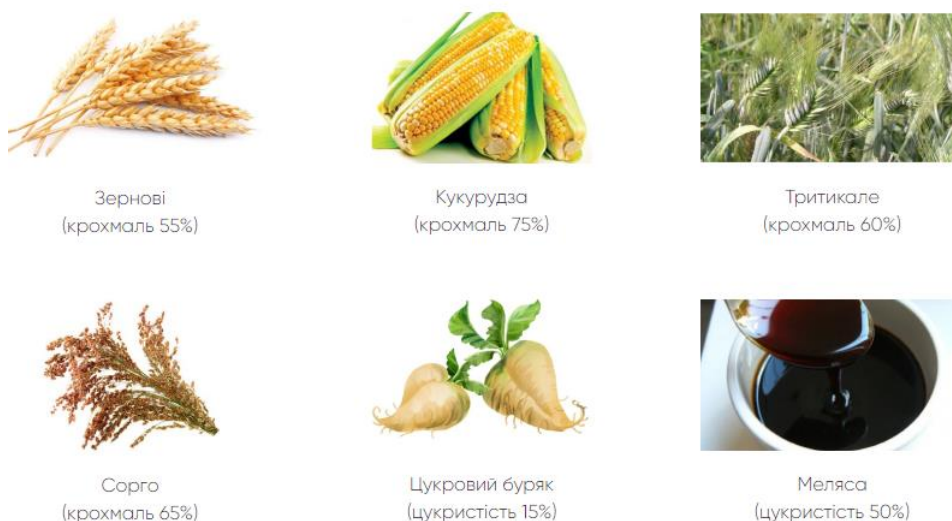


Рис. 1.4. Найбільш вживана сільськогосподарська сировина як субстрат для ферментації в процесі одержання біоетанолу [11].

Сировина другого покоління (лігноцелюозна): солома (пшенична, рисова, кукурудзяна); деревні залишки (тирса, стружка, кора), целюлозовмісні відходи паперової та целюлозної промисловості, очерет, енергетичні культури (міскантус, верба, тополя) (рис 1.5).

Має великий потенціал через відсутність конкуренції з харчовим ланцюгом, але вимагає складнішої попередньої обробки для деполімеризації лігноцелюлози до ферментованих цукрів.

Сировина третього покоління: мікрроводорості, макроводорості, промислові та органічні відходи.

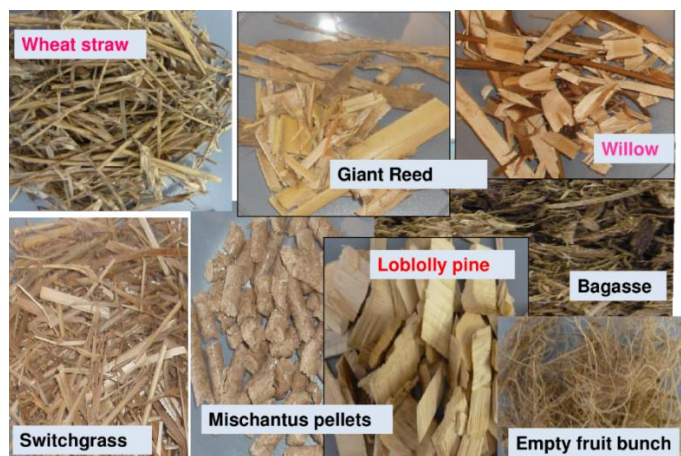


Рис. 1.5. Сировина 2 покоління для виробництва біоетанолу [12].

Розглядається як стратегічна альтернатива в майбутньому, має високий рівень виходу біомаси на одиницю площі, проте технології залишаються дорогими й недостатньо розвинутими.

Агропромислові відходи становлять суттєвий ресурс для виробництва біоетанолу, зокрема: солома пшениці – містить до 35–45% целюлози, 20–25% геміцелюлози, 10–20% лігніну; кукурудзяні стебла і качани – мають високу густину та волокнисту структуру, що підходить для ферментативного гідролізу (рис.1.6).



Рис. 1.6. Технологічний процес виробництва етилового спирту із кукурудзи [12].

Цукрова меляса – побічний продукт переробки буряка або тростини, з високим вмістом сахарози, глюкози і фруктози та відходи крохмале

переробної промисловості – можуть бути джерелом ферментованих цукрів після мінімальної обробки.

Україна має потужний аграрний потенціал: за оцінками, щорічно утворюється понад 50 млн тонн агровідходів, з яких понад 30% можуть бути використані як сировина для виробництва біоетанолу.

До перспективних енергетичних культур належать: міскантус (*Miscanthus giganteus*) – C₄-рослина, з високим вмістом целюлози, урожайність до 25 т/га сухої маси; енергетична верба (*Salix spp.*) – швидкоростуча рослина, цикли збору кожні 3 роки, урожайність до 15 т/га; цукрове сорго – має солодкий сік, а також стебла, багаті на клітковину.

Їх перевагами є адаптивність до маргінальних ґрунтів, мінімальна потреба в добривах, багаторічне вирощування та великий вихід біомаси.

Таблиця 1.1

Порівняльна оцінка різних видів субстратів для ферментації з метою одержання етилового спирту

Субстрат	Легкозбро- джуючі цукри	Складність переробки	Конкурен- ція з їжею	Вартість	Екологіч- ність
Кукурудза	Високий	Низька	Висока	Помірна	Сумнівна
Солома	Середній	Висока	Відсутня	Низька	Висока
Міскантус	Середній	Висока	Відсутня	Помірна	Висока
Меляса	Високий	Низька	Низька	Низька	Висока
Водорості	Дуже високий	Висока	Відсутня	Висока	Висока

Таким чином, при плануванні технологічного процесу виробництва біоетанолу, важливо враховувати: доступність і стабільність постачання сировини; хімічний склад та вміст перетворюваних вуглеводів; складність і вартість попередньої обробки; екологічні наслідки використання тієї чи іншої сировини.

Оптимізація вибору сировинної бази дозволяє зменшити витрати на переробку, покращити вихід продукту та забезпечити сталість процесу. Лігноцелюлозні відходи, незважаючи на технологічні складнощі, є

пріоритетним напрямом для розвитку біоетанольної промисловості України з огляду на їх велику доступність, відсутність конкуренції з харчовою сферою та екологічні переваги [13].

1.2. Основні етапи технологічного процесу виробництва біоетанолу

Виробництво біоетанолу – складний багатостадійний біотехнологічний процес, який передбачає послідовне перетворення сировини, зокрема вуглевмісних біомас, на кінцевий продукт – етанол, придатний для використання як рідке біопаливо. Структура цього процесу може варіюватися залежно від типу сировини (цукрова, крохмалиста або лігноцелюлозна), однак зазвичай включає такі основні етапи:

Підготовка сировини. Цей етап є критично важливим для ефективності подальших біотехнологічних процесів. Підготовка включає [14]:

- **Подрібнення та очищення:** Сировина подрібнюється до дрібнодисперсного стану для збільшення площі поверхні, що сприяє кращій дії ферментів або кислот під час гідролізу.
- **Термічна або хімічна обробка:** Залежно від типу біомаси (особливо лігноцелюлозної), застосовується попереднє розщеплення структурних компонентів (наприклад, целюлози) для полегшення подальшої ферментації. Застосовуються методи автогідролізу, кислотного або лужного гідролізу, парової вибухової обробки (steam explosion).
- **Стерилізація або пастеризація:** У деяких випадках перед ферментацією проводиться знезараження середовища для запобігання росту конкурентної мікрофлори.

Гідроліз полімерів. Для крохмалистої чи лігноцелюлозної сировини обов'язковим є етап гідролізу: крохмаль розщеплюється амілазами (α -амілаза, глюкоамілаза) до глюкози; целюлоза та геміцелюлоза в лігноцелюлозі розщеплюються до моносахаридів (головним чином глюкози, ксилози, арабінози) за допомогою ферментів (целюлази, ксиланази) або кислот.

Оптимальні умови гідролізу – pH 4,5–5,5, температура 45–55 °C, що дозволяє максимізувати вихід редукуючих цукрів.

Ферментація. Центральний біотехнологічний етап, у якому ферментовані цукри перетворюються на етанол мікроорганізмами. Залежно від типу цукрів застосовуються різні штами: *Saccharomyces cerevisiae* – класичний виробник етанолу з гексоз (глюкоза, фруктоза); *Zymomonas mobilis* – альтернативна бактерія, з вищою швидкістю ферментації; генетично модифіковані мікроорганізми (наприклад, рекомбінантні дріжджі) – можуть перетворювати пентози (ксилозу, арабінозу), що необхідно при переробці лігноцелюлозної сировини [15].

Ферментація триває 24–72 год при температурі 30–35 °C, $\text{pH} \approx 4,5\text{--}5,0$. У результаті утворюється етанол (до 10–12%) і побічні продукти (гліцерин, органічні кислоти).

Дистиляція та дегідратація. Для виділення етанолу з ферментаційної бражки застосовується дистиляція – фізико-хімічний процес розділення рідин із різними температурами кипіння: первинна дистиляція дозволяє отримати етанол з концентрацією 85–90%; ректифікація – етап очищення від домішок та доведення до 95–96%; дегідратація (зневоднення) – необхідна для отримання безводного етанолу ($\geq 99,5\%$), який використовується як паливо. Застосовуються адсорбенти (цеоліти), мембранні технології або екстракція.

Обробка побічних продуктів. Після дистиляції утворюється виниклий залишок – барда (distillers' grains), що містить білки, волокна, жири. Барду часто використовують [16]:

- як кормовий концентрат після сушіння (DDGS – dried distillers grains with solubles);
- як субстрат для біогазових установок;
- для виділення біологічно активних речовин.

Також утворюються стоки, які вимагають біологічного очищення, або утилізації відповідно до норм екобезпеки.

Енергетичне забезпечення процесу. Сучасні біоетанольні заводи проєктуються за принципами енергетичної самодостатності: використання залишкового тепла від процесів дистиляції; спалювання побічної біомаси;

інтеграція з ТЕЦ (теплоелектроцентралями) або біогазовими модулями; використання відновлюваних джерел енергії для підтримки температурних режимів ферментації.

Технологічний процес виробництва біоетанолу – багатокомпонентна система, що поєднує біохімічні, ферментативні, мікробіологічні та інженерні операції. Удосконалення кожного з його етапів (від попередньої підготовки до енергетичного замикання процесу) має вирішальне значення для зменшення витрат, підвищення виходу етанолу та екологічної сталості виробництва [17].

1.3. Вдосконалення окремих ланок технологічного процесу виробництва біоетанолу

Удосконалення технологічного процесу виробництва біоетанолу є ключовим напрямом наукових досліджень та інженерних розробок у контексті зростаючого попиту на відновлювані джерела енергії. Основна мета таких удосконалень – зниження витрат, підвищення виходу продукту, поліпшення екологічних характеристик виробництва та розширення спектру сировини. Особливу увагу приділяють модернізації наступних ланок технологічного ланцюга: підготовка сировини, гідроліз (для лігноцелюлозної сировини), ферментація, дистиляція та очищення кінцевого продукту.

Оскільки сировинна база може включати як крохмалевмісну, цукровмісну, так і лігноцелюлозну біомасу, значне вдосконалення спрямовано на попередню підготовку до ферментації. Особливо для лігноцелюлозної сировини, перед ферментацією необхідне руйнування складної структури клітинної стінки [18].

Сучасні дослідження фокусуються на застосуванні парового вибуху, кислотного та лужного гідролізу, а також комбінованих методів (наприклад, ультразвукове попереднє оброблення з подальшим ферментативним гідролізом). Застосування іонних рідин і глибоких евтектичних розчинів дозволяє розчиняти лігнін та покращити доступ до целюлози.

Гідроліз поліцукридів. Гідроліз – процес перетворення складних вуглеводів (целюлози, геміцелюлози) на прості цукри (глюкозу, ксилозу), які здатні ферментуватись до етанолу. Сучасні підходи передбачають використання ферментних коктейлів з високою активністю (целюлази, ксиланази, бета-глюкозидази), які дають змогу підвищити конверсію полісахаридів при м'яких температурних і кисло-лужних умовах [19].

Удосконалення ферментативного гідролізу включає генетичну інженерію мікроорганізмів-продуцентів ферментів, іммобілізацію ензимів для багаторазового використання, а також використання методів супутньої

гідролізу і ферментації (SSF – Simultaneous Saccharification and Fermentation), які значно скорочують загальний час процесу.

Ферментація. На цьому етапі розглядається біоконверсія простих цукрів в етанол з використанням мікроорганізмів. Основний об'єкт – дріжджі *Saccharomyces cerevisiae*, однак їх природна нездатність ферментувати пентози обмежує ефективність при використанні лігноцелюлозної сировини (рис.1.7).



Рис. 1.7. Технологічні режими ферментації субстратів для отримання біоетанолу (технічного етилового спирту) [20].

Удосконалення ферментації включає: модифікацію штамів дріжджів для метаболізму ксилози та арабінози (використання трансгенних дріжджів); ферментацію в безперервному режимі, яка забезпечує вищу продуктивність і стабільність; іммобілізацію клітин для повторного використання і покращеної стійкості до інгібіторів (фурфурол, HMF); ферментацію при підвищених температурах, що дозволяє поєднувати етапи і знижує витрати на охолодження.

Дистиляція та ректифікація. Процеси вилучення біоетанолу з бродильної рідини мають високі енергетичні витрати. Удосконалення включає використання енергоефективних методів [21]:

- Мембранні технології (первапорація, зворотній осмос) як попередній етап до дистиляції.
- Використання вакуумної дистиляції та теплообміну між потоками.
- Інтеграція дистиляції з ферментацією (технологія SSF з одночасним видаленням етанолу) для запобігання інгібуванню дріжджів високими концентраціями етанолу.

Утилізація побічних продуктів. Важливою складовою удосконалення є також переробка відходів біоетанольного виробництва – барди, лінгівомісного залишку, стічних вод. Перспективним напрямом є: анаеробне зброджування барди для виробництва біогазу; компостування або піроліз залишкової біомаси для одержання біовугілля; інтеграція з іншими біотехнологічними процесами (виробництво кормів, добрив, ферментів).

Інтеграція технологій і цифрове керування. Інтеграція всіх ланок виробництва в єдину систему з автоматизованим моніторингом та оптимізацією параметрів за допомогою IoT-технологій і штучного інтелекту відкриває нові горизонти енергоефективності та стабільності процесу. Моделювання на основі великих даних дозволяє адаптувати виробництво під конкретні умови сировини, сезону або енергетичних потреб [22].

Удосконалення технологічного процесу виробництва біоетанолу – це системна задача, що охоплює не лише технічні, а й біологічні, економічні та екологічні аспекти. Застосування інноваційних підходів до попередньої обробки сировини, гідролізу, ферментації, дистиляції та утилізації відходів дозволяє значно підвищити ефективність виробництва. У перспективі важливим завданням є впровадження біоетанольних комплексів нового покоління, які базуються на принципах замкненого циклу, біорефінерії та енергетичної самодостатності.

1.3.1. Інноваційні технології в виробництві етилового спирту

Основні напрями інновацій у галузі виробництва біоетанолу охоплюють нові методи підготовки сировини, вдосконалення гідролізу, застосування генетично модифікованих мікроорганізмів, інтеграцію біоконверсії з ферментацією, нові підходи до очищення та переробки побічних продуктів.

1. Передобробка лігноцелюлозної сировини. Інноваційні методи передобробки сировини мають на меті ефективно руйнувати структуру біомаси, зменшуючи споживання енергії та хімічних реагентів. Серед них виділяються: йонні рідини (ILs) – розчинники нового покоління, здатні ефективно руйнувати лігнінову матрицю, полегшуючи доступ до целюлози; глибокі евтектичні розчинники (DESS) – більш екологічна альтернатива йонним рідинам із низькою токсичністю; механіко-хімічна обробка – використання кульових млинів або інших пристроїв для зменшення розміру частинок та підвищення реакційної здатності субстрату [23].

Ці методи дозволяють знизити утворення інгібіторів ферментації (фурфуролу, HMF, фенолів) та забезпечують високий вихід цукрів.

Вдосконалення ферментативного гідролізу. Традиційні комерційні ферментні суміші мають високу вартість і обмежену активність. Нові підходи передбачають: використання комбінованих ферментних коктейлів, які діють синергічно на різні компоненти біомаси; розробку ферментів з підвищеною термо- та кислотостійкістю, які ефективніші в промислових умовах; застосування генної інженерії для створення мікроорганізмів-продуцентів ферментів, що одночасно гідролізують і ферментують субстрати (CBP – consolidated bioprocessing).

Генетично модифіковані штами для зброджування. Нові штами дріжджів та бактерій здатні зброджувати як глюкозу, так і пентози (ксилозу, арабінозу), що значно підвищує ефективність використання лігноцелюлозної сировини. Приклади: *Saccharomyces cerevisiae*, модифіковані для

метаболізму пентоз; *Zymomonas mobilis* – бактерії з високою продуктивністю етанолу та стійкістю до інгібіторів; *Clostridium thermocellum* – термофільний організм, здатний одночасно гідролізувати та зброджувати біомасу.

Інтеграція процесів (SSF та SSF-CBP). Сучасна тенденція полягає у поєднанні етапів гідролізу та ферментації в один технологічний блок (SSF – Simultaneous Saccharification and Fermentation), що дозволяє скоротити тривалість процесу, зменшити забруднення та підвищити вихід етанолу [24].

Більш досконалою є технологія CBP (Consolidated Bioprocessing), у якій один мікроорганізм або консорціум мікроорганізмів виконує всі етапи переробки біомаси.

Вдосконалені методи очищення біоетанолу. Для підвищення енергоефективності процесу широко впроваджуються: первапорація – мембранна технологія, яка дозволяє отримувати етанол високої чистоти без використання великої кількості енергії; ізотермічні процеси ректифікації – менш енергоємні альтернативи класичній ректифікації; адсорбційні методи – використання пористих матеріалів для селективного вилучення етанолу.

Інноваційним підходом є створення біоетанольних біорефінерій, які окрім етанолу виробляють побічні продукти з високою доданою вартістю: біогаз, біопласти, лігнінові композити, білкові концентрати. Це дозволяє повніше використовувати сировину і підвищити рентабельність виробництва.

Автоматизація та цифрові технології. Використання цифрових систем управління процесом (SCADA, IoT) для контролю температури, pH, концентрації субстратів. Моделювання та прогнозування процесів з використанням штучного інтелекту (машинне навчання, цифрові близнюки). Інтелектуальна оптимізація рецептів ферментації для підвищення виходу етанолу [25].

Інновації у біоетанольному виробництві змінюють традиційні підходи, забезпечуючи високу ефективність, економічну доцільність та екологічну безпеку. Завдяки інтеграції нових технологій ферментації, вдосконаленим

методам підготовки сировини та сучасним цифровим рішенням, сучасні біоетанольні заводи можуть стати конкурентоспроможною альтернативою традиційним нафтопереробним підприємствам. Подальші дослідження та впровадження інновацій сприятимуть сталому розвитку енергетичного сектору на основі відновлюваних ресурсів [26].

РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Біохімізм процесу одержання біоетанолу

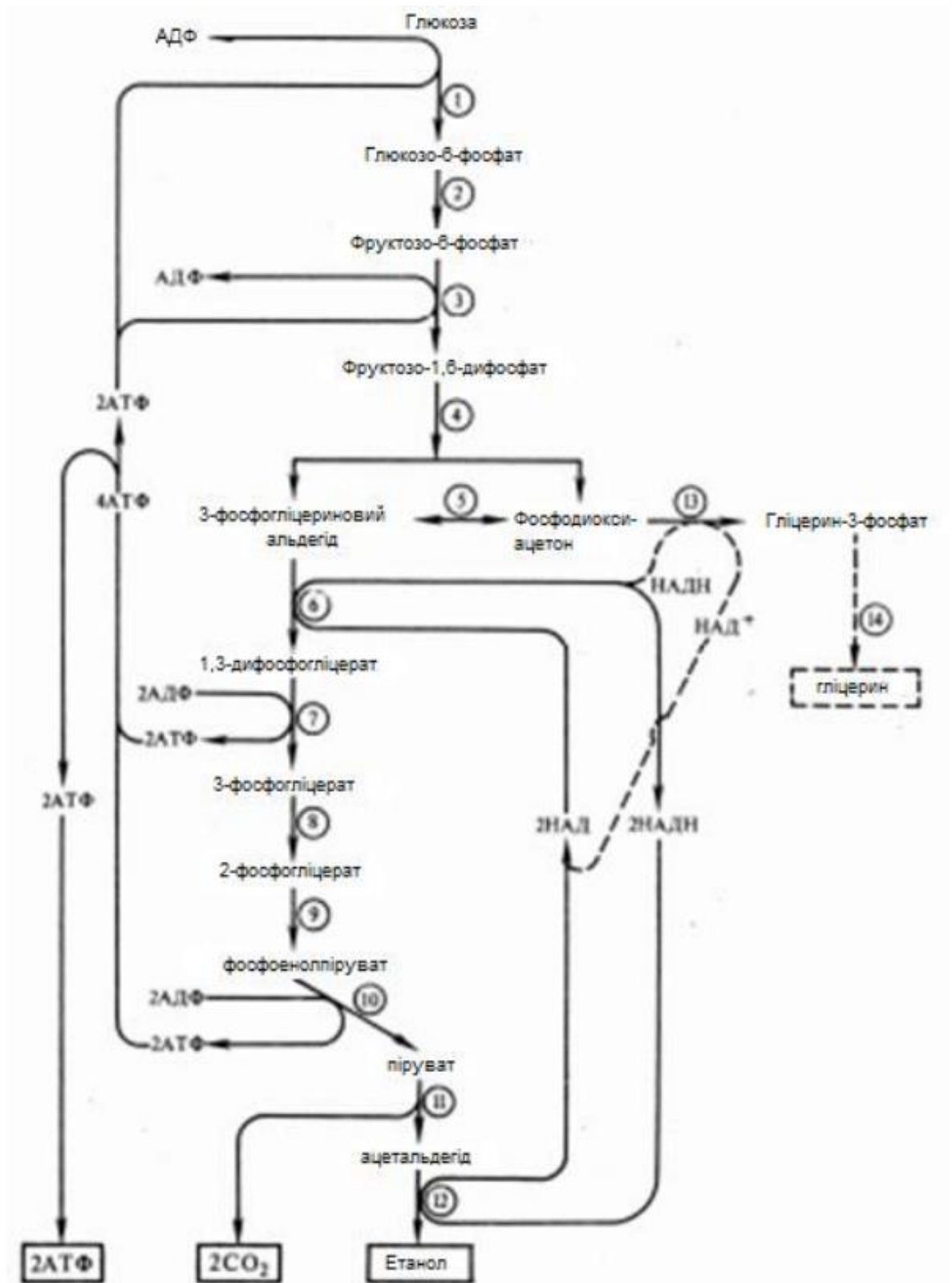
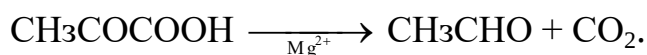


Рис. 2.1. Метаболічний цикл перетворення моноцукрів у етиловий спирт [27].

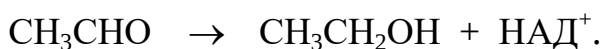
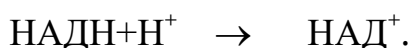
Метаболічні процеси анаеробного перетворення моноцукрів до піровиноградної кислоти відбувається за відомою схемою – гліколізом. Послідовність реакцій, які ведуть до утворення пірувату в анаеробному метаболізмі глюкози, у багатьох мікроорганізмів, а особливо в дріжджах подібні, як і у тваринних тканинах. На відміну від зворотного синтезу лактату, у дріжджів піруват піддається незворотному декарбоксилюванню до ацетатного альдегіду під дією піруватдекарбоксилази (остання відсутня в тканинах тварин):



піруватдекарбоксилоза

Молекула ферменту (мол. маса 1750) зв'язує чотири молекули тіамінпірофосфату – необхідного кофактору для цієї реакції. Як при окисненні пірувату, початкова стадія цього процесу зводиться до утворення оксиетилтіамінпірофосфату, але далі перенесення оксиетильної групи не йде і комплекс розпадається на вільний ацетальдегід з регенерацією кофермента.

Утворений таким шляхом ацетатний альдегід відновлюється НАДН+Н⁺ реакції, що каталізується алькогольдегідрогеназою [28]:



алькогольдегідрогеназа

Таким чином, в клітинах дріжджів, при окисненні гліцеральдегід-3-фосфату утворений НАДН+Н⁺ служить для відновлення ацетальдегіду, а не пірувату. Отже, кінцевим продуктом спиртового бродіння є етиловий спирт і CO₂.

Сумарне рівняння спиртового бродіння можна записати таким чином:



Враховуючи, що вибраний субстрат для ферментації – м'яса, яка багата на дисахариди, то можна загальну схему біохімічних перетворень подати наступною схемою (рис.2.2):

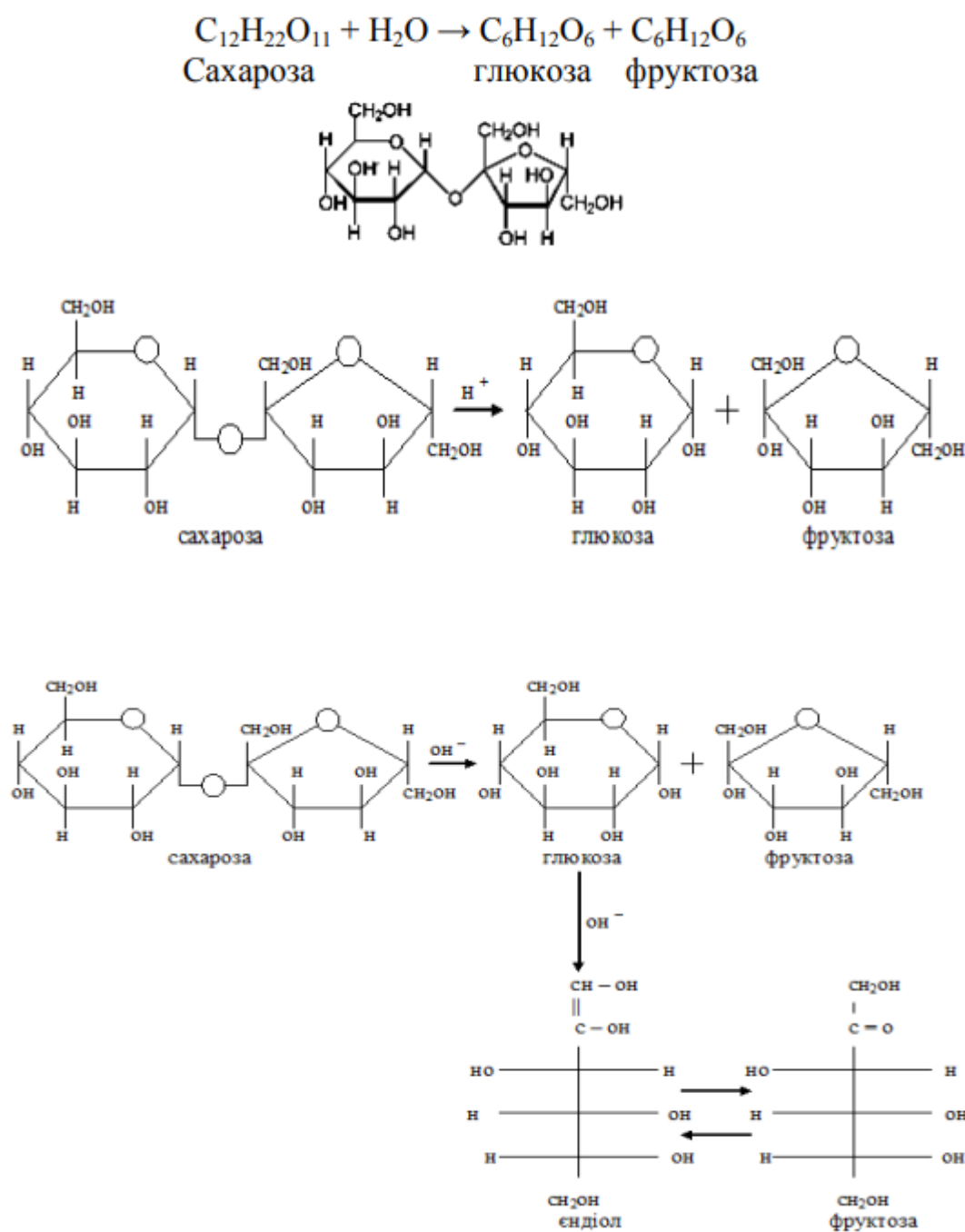


Рис. 2.2. Схема перетворення цукрози залежно від активного водно-кислого та водно-лужного середовища [29].

2.2. Матеріал і методи

Як основний субстрат для виробництва технічного етилового спирту (біоетанолу) за безвідходних технологій використовували мелясу як побічний продукт у процесі переробки цукрових буряків у харчовий продукт – цукор. Склад меляси за основними хімічними показниками наведений в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Усереднені основні хімічні показники меляси [30].

Показники меляси	Вміст
Сухі речовини (по рефрактометру), %	78,9-84,0
pH (активна кислотність)	6,7-9,5
Лужність, град	0,5-5,0
Кислотність, град	0,0-0,5
Азот (загальний), %	1,56-2,06
Фосфор (P_2O_5), %	0,039-0,055
SO_2 , %	0,012-0,060
Цукор:	
- по прямій поляризації	47,8-52,5
- інвертний	0,12-1,02
- рафінозний	0,06-1,08
Доброякісність, %	58,8-64,2
Леткі кислоти (в перерахунку на оцтову), %	0,36-1,0
Нітрати, %	0,03-0,30
Нітрити, %	сліди

Як видно із наведеної таблиці, у складі меляси знаходиться значна кількість легкозброджуючих цукрів – основного компоненту для синтезу етилового спирту, а також містяться, в незначній кількості, компоненти Нітратного та Фосфатного живлення, які відіграють важливе значення для проліферації дріжджових клітин. Для використання основного субстрату для культивування, меляса повинна відповідати відповідним, стандартним вимогам (табл. 2.2)

Продуцентами були популяція дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* раси М-5, які шляхом пересіванням одержували із музейних культур. Культивування, в лабораторних умовах, проводили в стерильних умовах у

колбах із базовим поживним середовищем – мелясою 12% сухої речовини із додаванням елементів Нітратного (карбамід) та Фосфатного (H_3PO_4) живлення після цього за температури $30 \pm 1^\circ\text{C}$ розводили мелясу водою до 27% СР. Кислотність на рівні рН 5,2 у м'ясному суслі нормували внесенням відповідної кількості H_2SO_4 [31].

Таблиця 2.2

Регламентні вимоги щодо якісних та кількісних показників меляси [32].

Назва показника	Характеристика	
Зовнішній вигляд	Густа в'язка непрозора рідина	
Колір	Від коричневого до темно-бурого	
Запах	Властивий буряковоцукровій мелясі без стороннього запаху	
Смак	Солодкий з гіркуватим присмаком	
Розчинність у воді	Повна, розчиняється у будь-яких співвідношеннях у гарячій і холодній воді	
Масова частка сухих речовин, %, не менше		75,0
Масова частка сахарози, %, не менше		43,0
Масова частка суми цукрів, що зброджуються, %, не менше		44,0
Величина рН		6,5 – 8,5
Загальна кількість мезофільних аеробних і факультативно-анаеробних мікроорганізмів, КУО в 1 г, не більше		$1,0 \times 10^5$
Плісняві гриби, КУО в 1 г, не більше		$1,5 \times 10^4$

Мелясу як базовий субстрат досліджували на суху речовину методом рефрактометрії, визначали рН на рН-метрі, суму цукрів визначали розрахунковим методом шляхом інверсійної поляризації. У м'ясному суслі досліджували концентрацію гліцеролу кольориметричним способом [33-36].

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Основні стадії технологічного процесу одержання біоетанолу із меляси

Таблиця 3.1

Регламентний опис повного технологічного циклу виробництва біоетанолу із
меляси – відходів переробки цукрових буряків [37].

ДР 1. Санітарна підготовка виробництва. ДР 1.1. Підготовка персоналу. Проводять інструктаж персоналу з правил техніки безпеки на виробництві та особливостей технологічного процесу. Всі працівники повинні проходити регулярний медичний огляд. Працівники мають бути забезпечені засобами індивідуального захисту.

ДР 1.2. Підготовка води очищеної. Очищення води відбувається на фільтрах грубої очистки, а потім проходить доочищення на установці зворотного осмосу. Важливо проводити аналізи води на хімічний вміст та мікробіологічну чистоту.

ДР 1.3 Підготовка гострої пари. Пару готують у спеціальних котлах при високому тиску. На цій стадії здійснюється технологічний контроль Кт – тиск пари, що подається в процес повинен складати 0,3 МПа.

ДР 1.4. Підготовка дезінфікуючих розчинів. ДР 1.4.1. Дезінфекція та миття приміщень та поверхонь обладнання проводиться розчином Хлораміну Б. Водні розчини Хлораміну Б не втрачають активний хлор протягом 15 днів, тому їх можна приготувати заздалегідь. Для приготування розчину змішують Хлорамін Б (містить 29% активного хлору) з водою, до концентрації 3%. Готують розчин у реакторах Р-7 місткістю – 5 м³, діаметр – 1800 мм, працює при атмосферному тиску, коефіцієнт заповнення - 0,7. Завантаження хлорного вапна здійснюється дозатором Д-6 відповідно. Реактор-змішувач оснащений лопатевою мішалкою.

ДР 1.4.2. Приготування розчину каустичної соди. Для обробки обладнання та прилеглих комунікацій використовують розчин каустичної соди. Його готують шляхом змішування порошкоподібної соди з водою, до концентрації - 40%. Готують розчин у вище згаданому реакторі Р-9. Готовий розчин транспортується насосом до стадії обробки обладнання та прилеглих комунікацій (ДР 1.6.).

ДР 1.5. Підготовка виробничих приміщень. За допомогою Хлораміну Б, що був підготовлений на стадії ДР 1.4.1., проводять прибирання підлоги, зовнішніх поверхонь обладнання і трубопроводів. Відпрацьовані розчини відправляються на стадію знешкодження до ЗВ 16.1.

ДР 1.6. Підготовка обладнання та прилеглих комунікацій. ДР 1.6.1. Миття обладнання та прилеглих комунікацій. Видалення забруднень з апаратури проводять шляхом його промивки водою впродовж 2-ох хвилин. Відпрацьована вода надходить у збірник нейтралізації, перед скидом до міської каналізації.

ДР 1.6.2. Ополіскування обладнання та прилеглих комунікацій. Даний етап проводиться очищеною водою при температурі 80°C протягом 10 хв. Стічні води зливаються і направляються до стадії ЗВ 16.1.

ДР 1.6.3. Дезінфекція обладнання та прилеглих комунікацій. Дезінфекцію обладнання та комунікацій здійснюють розчином каустичної соди (40%) зі стадії ДР 1.4.2 протягом 1 години. Відпрацьований розчин нейтралізується і відводиться до ЗВ 16.1.

ДР 1.6.4. Ополіскування обладнання та прилеглих комунікацій. Даний етап проводиться очищеною водою при температурі 80 °C протягом 1 години. Стічні води зливаються і направляються до стадії ЗВ 16.1.

ДР 1.6.5. Перевірка на герметичність. Тетрахлорметан закачують в герметично закриті обладнання та комунікації до тиску 0,2 МПа та за допомогою датчика-шукача галогенопохідних проводять огляд всіх з'єднань обладнання та комунікацій.

ДР 1.6.6. Стерилізація обладнання та прилеглих комунікацій. Стерилізацію обладнання та комунікацій проводять обробкою насиченою водяною парою при температурі 120-130°C, за тиску 0,3 МПа упродовж 1 год з подальшим охолодженням упродовж 3,5 год.

ДР 2. Приготування теплоносіїв. ДР 2.1. Підготовка охолодженої води. В холодильних установках здійснюється охолодження води. В теплообмінник подається технічна вода та холодоагент. Подача води здійснюється через Н-11.

ДР 2.2. Підготовка гарячого теплоносія. В теплообмінниках ТО-12 при температурі 100°C та при атмосферному тиску здійснюється приготування

продовження табл. 3.1

перегритої пари із проведенням технічного контролю.

ДР 3. Підготовка стерильного повітря. Здійснюють забір атмосферного повітря ЗП-14, з точкою забору 4-6 м вище рівня землі. Далі на фільтрах Ф-15 з діаметром пор 1,5 мкм повітря очищається від пилу та інших механічних домішок, після чого здійснюється компресування повітря. Повітря проходить стерилізацію в індивідуальних фільтрах Ф-19 та Ф-20 перед подачею в інокулятор та посівний ферментер (дрідждегенератор).

ДР 4. Підготовка допоміжних розчинів. ДР 4.1. Приготування та стерилізація розчину карбаміду. Розчин карбаміду готують шляхом змішування карбаміду з водою до концентрації 20%. Завантаження карбаміду здійснюється через дозатор Д-21. Реактор оснащений лопатевою мішалкою, частота обертання валу мішалки - 1с^{-1} , потужність електродвигуна з редуктором 20 кВт. Після стерилізації охолоджують до температури $30\sim 1^{\circ}\text{C}$ шляхом подачі води в сорочку апарату. Проводять технічний контроль.

ДР 4.2. Приготування та стерилізація розчину ортофосфорної кислоти. Розчин ортофосфатної кислоти використовують в якості джерела фосфатного живлення. Його готують шляхом змішування кислоти з водою, до концентрації 70%. Завантаження здійснюється через дозатор Д-24. Після стерилізації охолоджують до температури $30\sim 1^{\circ}\text{C}$ шляхом подачі води в сорочку апарату.

ДР 5. Підготовка культури *S. Cerevisiae*. ДР 5.1. Змішування компонентів поживного середовища. Через дозатор Д-27, Д-28, Д-29 в реактор Р-31 подаються мелясне сусло, питну воду в співвідношенні 3:7 відповідно, а також додають розчин сірчаної кислоти, розчин карбаміду, розчин ортофосфорної кислоти. У реакторі здійснюється перемішування лопатевою мішалкою до повного розчинення частинок. Об'єм реактора 10 м^3 . Стерилізацію проводять при тиску 0,3 МПа та температурі 115°C протягом 15 хв. На даній стадії проводять технологічний та мікробіологічний контроль.

ДР 5.3. Культивування. В ферментері Ф-35 об'ємом 10 м^3 з турбінною мішалкою та сорочкою відбувається вирощування чистої культури *S. cerevisiae*.

продовження табл. 3.1

посівний матеріал – виробничу культуру *S. cerevisiae* через Д-33. Тривалість культивування складає 9-12 годин. На стадії проводять наступні види контролю: технологічний контроль Кт – контроль температури в сорочці і в середині апарату ($30 \pm 2^\circ\text{C}$), хімічний контроль Кх – контроль значення рН вмісту апарату ($\text{pH} = 6,2 \pm 2$) і мікробіологічний контроль Кмб – визначення кількості мікроорганізмів у пробі.

ДР 5.4. Отримання біомаси. У ферментері Ф-39 об'ємом 10 м^3 обладнаному турбінною мішалкою, секційною сорочкою, відбувається культивування чистої культури до потрібної концентрації. Чиста культура дріжджів з Ф-35 насосом Н-36 через подають у апарат, також насосом дозатор Д-37 надходить поживне середовище. Температура у ферментері $29 \pm 2^\circ\text{C}$ і рН складає близько 6,8. Суспензія постачається у ферментер Ф-64 на стадію ТП. 9. На даній стадії здійснюються всі три види контролю.

ДР 6. Підготовка культури *A. Niger*. ДР 6.1. Змішування компонентів поживного середовища. Через дозатор Д-42 в реактор Р-44 подаються мелясне сусло, воду в співвідношенні 3:7 відповідно, а також додають, розчин ортофосфornoї кислоти через дозатор Д-41. У реакторі здійснюється перемішування лопатевою мішалкою до повного розчинення частинок. Об'єм реактора 10 м^3 Проводять хімічний контроль Кх- значення рН – $6,8 \pm 0,2$ та технологічний Кт – температура $45 \pm 2^\circ\text{C}$

ДР 6.2. Стерилізація поживного середовища. Стерилізацію проводять при тиску $0,3 \text{ МПа}$ та температурі 115°C протягом 15 хв. На даній стадії проводять технологічний та мікробіологічний контроль.

ДР 6.3. Культивування В ферментері Ф-48 об'ємом 10 м^3 з турбінною мішалкою та сорочкою відбувається вирощування чистої культури *A. niger*. Через насос Н-45 в апарат надходить поживне середовище, також в апарат подають посівний матеріал – виробничу культуру *A. niger* через Д-46.

ДР 6.4. Тривалість культивування складає 24 годин. На стадії проводять описані вище види контролю.

продовження табл. 3.1

апарату ($pH = 6,1 \pm 1$) і мікробіологічний контроль Кмб – визначення кількості мікроорганізмів у пробі.

ДР 6.4.1. Отримання біомаси. В більшому ферментері Ф-52 об'ємом 10 м³ обладнаному турбінною мішалкою, секційною сорочкою, відбувається культивування чистої культури до потрібної концентрації. Чиста культура з Ф-48 насосом Н-49 подають у апарат, також через дозатор Д-50 надходить поживне середовище за температури $29 \pm 2^\circ\text{C}$ і pH 6,8. Суспензія постачається у ферментер Р-64 на стадію ТП. 9. На даній стадії здійснюються всі три види контролю.

ДР 7. Приготування піногасника. ДР 7.1. Стерилізація апарату. Перед заповненням апарат Р-55 стерилізують протягом 1 години при тиску 0,1-0,12 МПа і температурі $120-124^\circ\text{C}$.

ДР 7.2. Приготування емульсії піногасника. Приготування емульсії піногасника проводять змішуючи олеїнову кислоту та воду протягом 1 год.

ДР 7.3. Стерилізація піногасника. Стерилізація піногасника проводиться парою через сорочку при температурі $120-126^\circ\text{C}$ і надлишковому тиску 0,1-0,14 МПа протягом 4 годин. Проводять технічний контроль процесу.

ДР 8. Підготовка сировини ДР 8.1. Розбавлення м'яса. Зі збірників на складі м'яса подається до реактора Р-58 через Д-57, куди також подається вода. Для гомогенізації середовища використовують пропелерну мішалку. Розчин м'яса насосом Н-59 перекачують до установки безперервної стерилізації.

ДР 8.2. Термічна обробка м'яса. Перегріта пара до $135-145^\circ\text{C}$ надходить до реактору Р-58. Обробка триває 1,5 год. На стадії здійснюють технологічний контроль Кт - контроль температури, ($135-145^\circ\text{C}$) і тиску всередині апарату.

ДР 8.2.1. Нагрівання розчину м'яса до температури стерилізації. Нестерильний розчин м'яса центробіжним насосом подається в підігрівач з вприском гострої пари, куди також подається пара ($p=0,6$ МПа). Розчин м'яса швидко нагрівається до 120°C протягом 10 хв. Продуктивність апарату 20 м³/год, місткість 0,1 м³. Пара вводиться через сопло діаметром 2,5 мм тангенціально розташованого штуцера, об'єм утвореного конденсату 0,5 м³ /год. Після нагрівання м'яса подається до нижнього патрубку витримувача.

ДР 8.2.2. Витримування розчину меляси при температурі стерилізації. Далі мелясу витримують при температурі стерилізації ($t=120^{\circ}\text{C}$), за рахунок чого продовжується час стерилізації та досягається загибель максимальної кількості мікрофлори.

ДР 8.2.3. Рекуперація тепла. Рекуперація відбувається в рекуператорі, який являє собою теплообмінник розбірний пластинчатого типу. Загальна поверхня теплообміну 100 м^2 , поверхня однієї пластини $0,5\text{ м}^2$. В процесі рекуперації, стерильний розчин нагріває нестерильний розчин меляси, який потім поступає в нагрівач, а стерильне середовище охолоджується до 90°C .

ДР 8.2.4. Охолодження стерильного розчину меляси. З рекуператора стерильний розчин меляси надходить до теплообмінника охолоджувача розбірного пластинчатого типу, де він охолоджується до 30°C , після чого – стерильний розчин меляси поступає в Р-32 та Р-44 для приготування поживних середовищ.

ТП 9. Виробничий біосинтез. У ферментер Ф-64 охолоджений субстрат надходить через насос Н-59 дозатором Д-60, підготовлені культури із стадії ДР 5.4. та ДР 6.4 через Д-62 та Д-63, де відбувається зброджування у безперервному ферментері. Процес проводиться в анаеробних умовах при температурі $29\pm 1^{\circ}\text{C}$ протягом 34 год., за рН близьке 5. Під час бродіння відбувається утворення етанолу та метанолу. На цій стадії здійснюються всі види контролю: технологічний контроль Кт має на меті контроль за температурою в апараті $29\pm 1^{\circ}\text{C}$ та сорочці апарату, а також за тиском в апараті і витратами рідини, що поступає в кожен ферментер; хімічний контроль Кх полягає у підтримці значення рН на рівні 5; мікробіологічний контроль Кмб обумовлений визначенням чистоти культури і кількістю синтезованого продукту в певний період часу.

ТП 10. Відділення *Saccharomyces cerevisiae* та *Aspergillus niger* на сепараторі. Після бродіння суміш подається в безперервно працюючий сепаратор. Технологічний контроль Кт полягає у вимірюванні числа обертів сепаратору, а мікробіологічний контроль Кмб здійснюється для

підтвердження відсутності біологічних агентів у збірнику.

ТП 11. Відділення етанолу на ректифікаційній установці. ТП 11.1. Очищення в бражній колоні. Суміш спиртів зі збірників подається на живильну тарілку бражної колоні РК-70, яка працює при атмосферному тиску. Пара подається в нижню частину колоні. Стікаючи по тарілках вичерпної частини колоні вниз, бражка зустрічає на своєму шляху пару, що підіймається вгору. Пара поступово збагачуючись спиртом, переходить в верхню частину колоні. На даній стадії передбачено технологічний контроль Кт– контроль за температурою (на живильній тарілці 80°C, у нижній частині колоні 90°C) і тиском всередині колоні (0,2 МПа), а також контроль витрат бражки, що поступає в колону і хімічний контроль Кх – вимірювання концентрації спирту, яка після бражної колоні повинна складати близько 50 %. Контрольні прилади як у попередніх стадіях.

ТП 11.2. Очищення в ректифікаційній колоні. Конденсат насосом Н-71 поступає на живильну тарілку ректифікаційної колоні РК-72, яка працює при атмосферному тиску. Ця колона працює аналогічно бражній колоні, але на більш високих концентраціях спирту. В нижню частину колоні подається пара, яка поступово забирає спирт зі спиртового конденсату, що стікає вниз по колоні. Звільнена від спирту рідина називається лютером і йде на стадію ПВ15.1. Вміст спирту в лютері складає не більше 0,02 %. Над верхньою колоною ректифікаційної колоні встановлюється дефлегматор. Сконденсована в ньому пара стікає назад в колону, а частина низько киплячих фракцій відбирається у вигляді ефіроальдегідної фракції. В середній частині колоні, де міцність спирту складає 45–50%, накопичуються сивушні масла, які представляють собою суміш вищих спиртів.

Етанол, звільнений від ефірів і альдегідів, а також сивушних масел, відбирається з верхніх тарілок закріплюючої частини ректифікаційної колоні і поступає на живильну тарілку колоні. Далі передбачено технологічний контроль Кт, що зумовлений контролем за температурою в кубовій частині колоні та тиском (0,2

МПа) в колоні, і за витратами водно-спиртової суміші, що поступає в ректифікаційну колону і хімічний контроль Кх— контроль за концентрацією спирту (94—95%). Контрольні прилади як у попередніх стадіях.¶

ТП 11.3. Очищення в метанольній колоні. Біоетанол з вмістом ацетону близько 0,7% за допомогою насосу Н-73 подається на живильну тарілку метанольної колони РК-74, що працює при атмосферному тиску. В ній легкокиплячою фракцією є ацетон, який піднімається у верхню частину колони, закріплюється в дефлегматорі і зливається у збірники. Етанол, стікаючи по тарілках, опускається в нижню частину колони і зливається в збірник за допомогою насосу Н-75. На цій стадії передбачені всі види контролю.¶

ТП 12. Зневоднення на молекулярних ситах. Ректифікований біоетанол, отриманий з брагоректифікаційної установки, подається в нагрівач Н-76, місткістю 0,1 м³, з вприском гострої насиченої пари (колонка швидкісного нагріву), де температура підвищується приблизно до 115°C. Продуктивність нагрівача 20 м³/год, пара вводиться через сопло діаметром 2,5 мм тангенціально розташованого штуцера, тиск пари – 0,6 МПа, температура 130-135 °С.

ПМВ 13. Розлив біоетанолу. Розлив палива біоетанолу здійснюється у каністри місткістю 60 л згідно ДСТУ EN 12712:2005 «Каністри пластмасові. Каністри номінальної місткості від 20 дм³ до 60 дм³, розраховані на оптимальне використання піддонів розмірами 800 мм 1200 мм, 1000 мм 1200 мм, 1140 мм 1140 мм». Наповнення не більше ніж 90% обсягу.

ПМВ 14. Пакування і маркування кінцевої продукції. Етанол розливають у каністри згідно регламенту. Маркування повинно передбачувати попереджувальний знак, який описує горючі здатності рідини та знак «Ек» - позначення біопалива. Гарантійний строк зберігання – не більше 5 років

ПВ 15. Переробка відходів. ПВ 15.1. Утилізація лютерної води. Лютерна вода може підлягати очищенню на локальних очисних спорудах і використовуватись як технічна вода або скидається в каналізацію.

ПВ 15.2 Утилізація CO₂. Вуглекислий газ з бражного сепаратора надходить до компресора першого ступеня, в якому газ стискається до проміжного тиску $p=0,6$

продовження табл. 3.1

МПа. Потік газу проходить через теплообмінник, де охолоджується потоком газу низького тиску, що повертається на компресор. Охолоджений газ надходить до компресора другого ступеня, в якому газ стискається до кінцевого тиску $p=20$ МПа. Потім знову надходить на охолодження до теплообмінника.

ПВ 15.3. Утилізація сивушної фракції. Сивушну фракцію переробляють для отримання сивушного масла.

ЗВ 16 Знешкодження відходів. Метою стадії є шляхом утилізації відходів виробництва, які не можуть бути використані в будь-якому вигляді, забезпечення екологічної безпеки виробництва.

ЗВ 16.1. Знешкодження рідких відходів. Дана стадія має на меті доведення рідких відходів виробництва до норм скиду в каналізацію.

ЗВ 16.2. Знешкодження тетраклорметану. На даній стадії проводять очищення тетрахлоорметану шляхом гідролізу.

ЗВ 16.3. Знешкодження пари. Дана стадія має на меті компресування пари та подальше очищення до норм скиду в каналізацію.

3.1.1. Матеріальні затрати для виробництва етилового спирту із м'ясного субстрату

У табл. 3.2. матеріальні витрати (баланс), які використані в процесі виробництва біоетанолу із використанням м'яси як одного субстрату за один цикл виробництва.

Таблиця 3.2

Матеріальні витрати за повний цикл виробництва біоетанолу [38].

Використано			Отримано		
Стадія	Назва сировини, матеріалів та напівпродуктів	К-ть	Стадія	Назва кінцевого продукту/ напівпродукту відходів і втрат	К-ть
		кг			кг
1	2	3	4	5	6
ДР 1.4.1. Приготування розчину Хлораміну Б	Хлорамін Б	1	ДР 1.4.1. Приготування розчину Хлораміну Б	Розчин Хлораміну Б	31
	Вода питна	30			
ДР 1.4.2. Приготування розчину каустичної соди	Каустична сода	3	ДР 1.4.2. Приготування розчину каустичної соди	Розчин каустичної соди	13
	Вода питна	10			
ДР 4.1. Приготування і стерилізація р-ну карбаміду	Карбамід	11	ДР 4.1. Приготування і стерилізація р-ну карбаміду	Розчин караміду	11,4
	Вода питна	0,4			
ДР 4.2. Приготування і стерилізація розчину ортофосфорної кислоти	Ортофосфатна кислота	11	ДР 4.2. Приготування і стерилізація розчину ортофосфорної кислоти	Розчин ортофосфатної кислоти	11,4
	Вода питна	0,4			

продовження табл. 3.2

1	2	3	4	5	6
ДР 5. Підготовка культури <i>S. cerevisiae</i>	Компоненти поживного середовища	8	ДР 5. Підготовка культури <i>S. cerevisiae</i>	Біомаса культури <i>S. cerevisiae</i>	21
	Вода питна	12			
	Культура <i>S. cerevisiae</i>	1			
ДР 6. Підготовка культури <i>A. niger</i>	Компоненти поживного середовища	4	ДР 6. Підготовка культури <i>A. niger</i>	Біомаса культури <i>A. niger</i>	10,5
	Вода питна	6			
	Культура <i>A. niger</i>	0,5			
ДР 8.1. Розбавлення меляси	Меляса (СР 65%)	40	ДР 8.1. Розбавлення меляси	Розчин меляси (СР 40%)	60
	Вода питна	20			
ТП 9. Виробничий біосинтез	Розчин меляси	60	ТП 9. Виробничий біосинтез	Вуглекислий газ	6,5
	Біомаса <i>S. cerevisiae</i>	21		Бражка	85
	Біомаса <i>A. niger</i>	10,5			
ТП 11. Відділення етанолу на ректифікаційн ій установці	Бражка	85	ТП 11. Відділення етанолу на ректифікаційн ій установці	Етанол	78
	Пара	200		Метанол	8
				Сивушні масла	0,1
				Лютерна вода	90
				Витрати	108,9
Всього:	534,8		Всього:	534,8	

3.2. Оптимізація технологічному процесу виробництва етилового спирту із м'ясного субстрату

Виробництво біоетанолу як одного з основних видів біопалива із використанням як субстрату м'яси має величезне значення для сучасної енергетики та сталого розвитку (рис. 3.1).

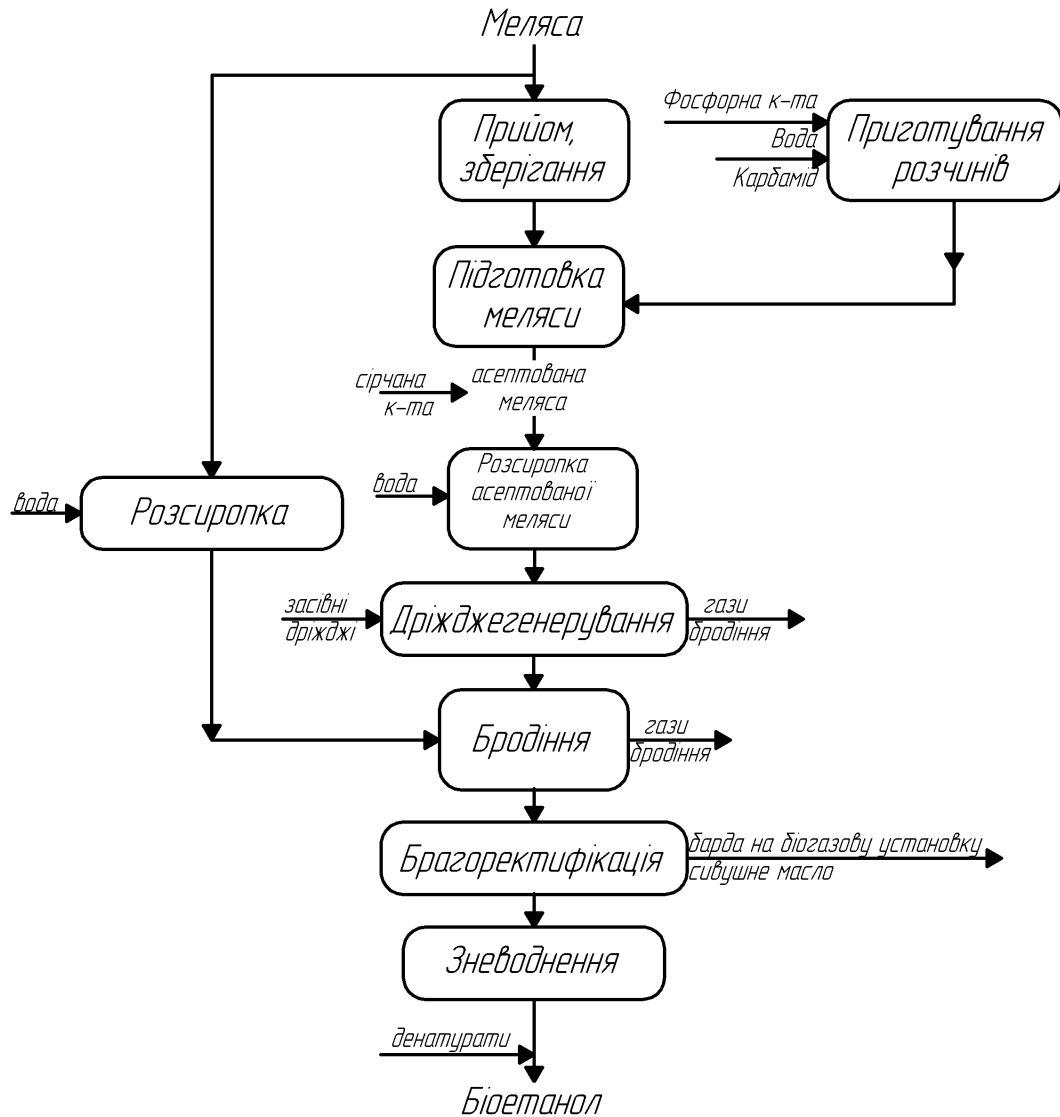


Рис. 3.1. Концептуальна технологічна схема одержання біоетанолу за використанням як субстрату для ферментації – м'яси [39].

Поряд із цим, м'яса як побічний продукт переробки цукрових буряків чи цукрової тростини, може бути використана в інших галузях економіки, зокрема в галузі тваринництва як кормовий компонент та шляхом ферментації для виробництва цілої низки БАП (рис. 3.2).

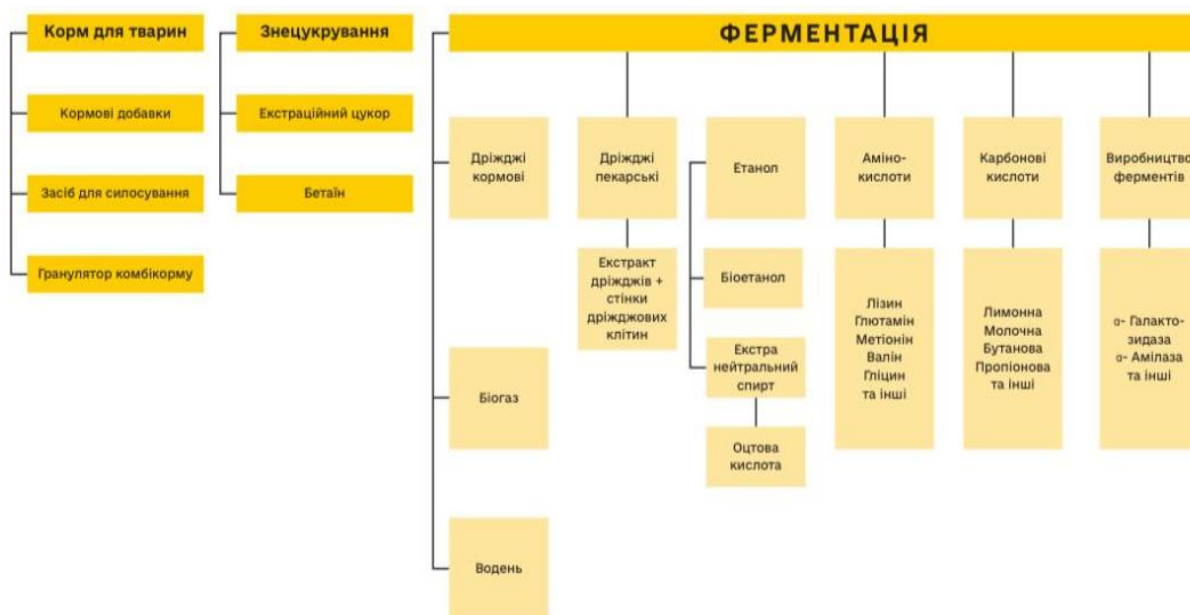


Рис. 3.2. Використання меляси в різних галузях економіки [40].

У контексті глобальних кліматичних змін, зростання енергетичних потреб та необхідності зменшення викидів парникових газів біоетанол виступає як екологічно чиста, відновлювальна альтернатива викопним видам палива. Його впровадження дозволяє не лише підвищити енергетичну незалежність держав, але й стимулює розвиток аграрного сектора, створює нові робочі місця та сприяє інноваційному розвитку біотехнологій.

Саме одержання біопалива другого покоління вважається найбільш сталим, адже дозволяє переробляти органічні відходи та нетрадиційні джерела біомаси без конкуренції з харчовим сектором (рис. 3.3). Проте такі технології вимагають значно складнішої та вдосконаленої технологічної схеми, особливо на етапах попередньої обробки сировини, гідролізу, ферментації та рекуперації енергії.

Особлива увага слід приділити технологічним аспектам процесу, зокрема ферментації, гідролізу, ферментативної обробки та очищення кінцевого продукту. Вдосконалення кожної із цих стадій, застосування сучасних методів біотехнології – таких як використання генетично модифікованих штамів мікроорганізмів, іммобілізація ферментів,

консолідовані біопроцеси – дозволяють значно підвищити продуктивність, скоротити час переробки та знизити енергозатрати. Інноваційні технології також сприяють підвищенню стійкості виробництва до змін у якості сировини, що є ключовим фактором для комерційного застосування.

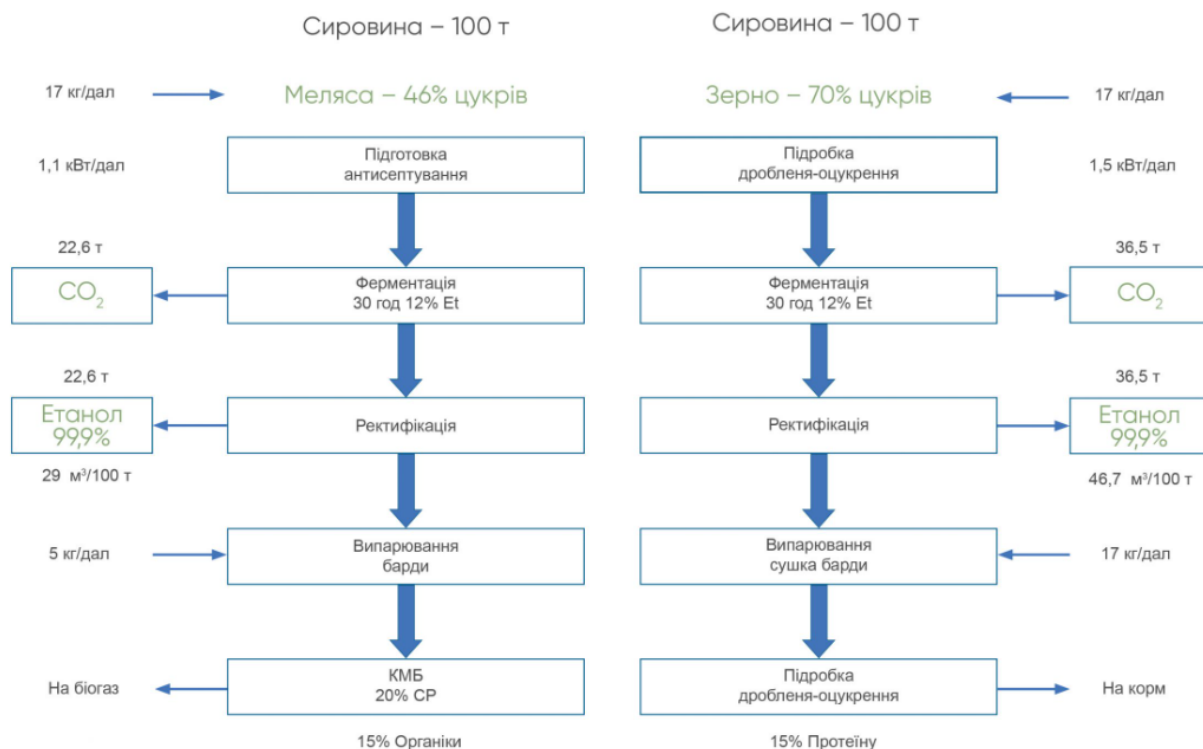


Рис. 3.3. Порівняльна характеристика безвідходного виробництва етилового спирту із використанням різних субстратів [41].

Характеристика безвідходних технологій переробки субстратів м'яси і злакових культур у біоетанол демонструє екологічну та економічну доцільність використання саме м'яси як основної сировини для виробництва біопалива II покоління.

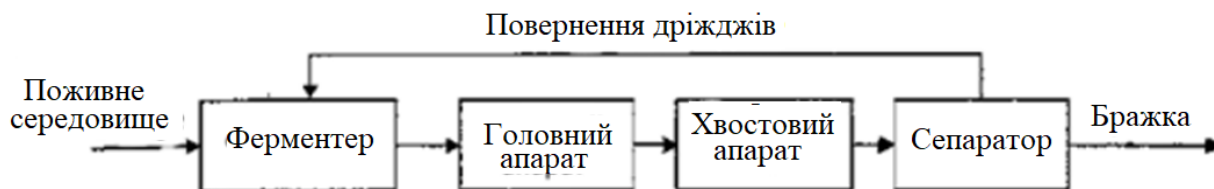


Рис. 3.4. Блок-схема технології одержання біоетанолу [42].

Сам процес безвідходної ферментації поживного середовища – м'яси проходить за класичною схемою (рис.3.4). При цьому, значна роль

відводиться впровадженню принципів циркулярної економіки, коли виробництво біоетанолу інтегрується з утилізацією відходів і виробництвом додаткових продуктів, таких як кормові білки, біогаз, біопластики.

Такий підхід підвищує загальну ефективність та рентабельність підприємств, дозволяє значно знизити екологічний слід виробництва, зменшує навантаження на навколишнє середовище.

Важливим напрямом у економічно доцільному виробництві та використанні біопалива II покоління – біоетанолу із використанням м'яси як основного субстрату для ферментації є оптимізація операційних параметрів та поживного середовища, що підвищить конкурентну спроможність виробництва альтернативного джерела енергії.

Оптимізація окремих параметрів технологічного процесу може значно впливати на приріст популяції дріжджів в м'ясному суслі, як продуцентів цільового продукту – біоетанолу. На рис. 3.5, наведена динаміка приросту продуцента залежно від кількості висіяних дріжджів у м'ясне сусло та часу ферментації.

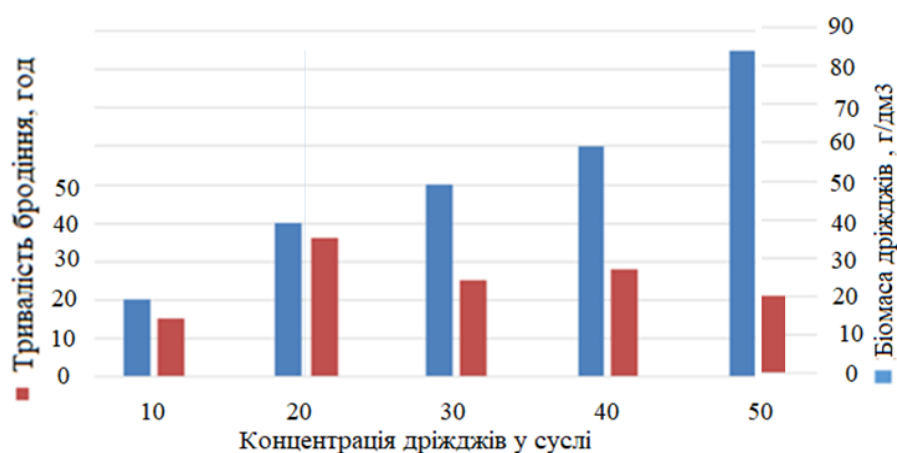


Рис. 3.5. Динаміка приросту біомаси дріжджів залежно від кількості популяції клітин дріжджів у суслі (мг/дм³) та часу ферментації, год

Найвищий приріст біомаси дріжджів спостерігався упродовж 20 годин культивування м'ясного суслу із початковим вмістом дріжджів 50 мг/дм³. За таких параметрів культивування приріст біомаси був на рівні 86 мг/дм³, що в 1,7 рази перевищував біомасу дріжджів до початку ферментації. Такий

приріст біомаси дріжджів є найбільш оптимальним за даних умов ферментації, при цьому також знижується час ферментації на 28%, що має переваги над іншими зразками в економічному плані.

За початкової концентрації дріжджів у м'ясному суслі 40, 30, 20 та 10 мг/дм³, приріст маси продуцента відповідно складав 60, 50, 40 та 20 мг/дм³, за різний час ферментації від 18 до 28 годин.

Кількість внесеної дріжджової закваски в м'ясне сусло також впливає на вміст гліцеролу та етилового спирту в культуральному середовищі в процесі ферментації (рис. 3.6). На даному рисунку видно, що із збільшенням початкової концентрації посівного матеріалу (дріжджів-продуцентів) у м'ясному суслі на початку ферментації, зростає вміст етилового спирту та частково знижується концентрація гліцеролу.

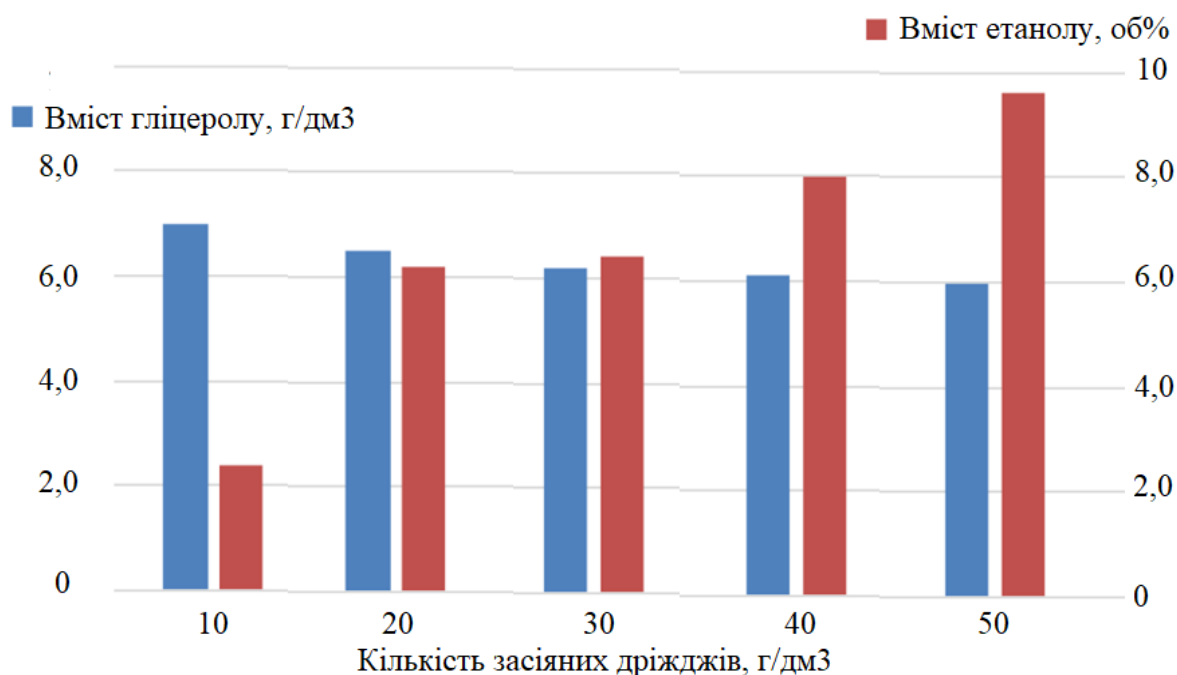


Рис. 3.6. Динаміка вмісту етилового спирту та гліцеролу залежно від концентрації дріжджів у суслі, г/дм³.

Починаючи із концентрації 30 г/дм³ засіяних дріжджів на поживне середовище, вміст етилового спирту зростає, а, на томість, вміст гліцеролу – знижується. Найвища кількість біоетанолу, ми спостерігали, за концентрації

50 г/дм³ посівного матеріалу – дріжджів-продуцентів у м'ясному суслі, його вміст складав 9,7 %об, що на 17,5% та 36,1% перевищував відповідні показники при використанні 40 г/дм³ та 30 г/дм³. Одночасно вміст гліцеролу, за таких умов культивування, знизився на 15,2%.

Враховуючи дані наших експериментальних досліджень, ми припускаємо, що засівна концентрація в 50 г/дм³ дріжджів-продуцентів етилового спирту в м'ясне сусло є оптимальною кількістю. А тому, в подальших наших дослідженнях, буде використовуватися саме та концентрація.

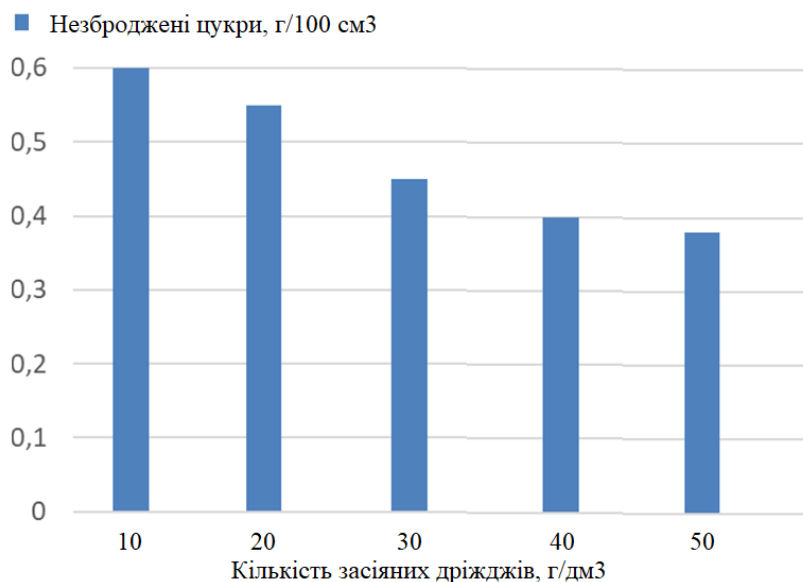


Рис. 3.7. Динаміка вмісту незброджених цукрів у м'ясному суслі залежно від кількості засіяних дріжджів у ньому

Дослідження динаміки використання вуглеводів м'яси в процесі зброджування м'ясного сусла засіяного продуцентами етанолу наведено на рис.3.7. Із зростанням концентрації із 10 до 50 г/дм³ засіяних популяцій дріжджів у м'ясному суслі, рівень незброджений вуглеводів значно знижується.

Найменшу кількість незброджених вуглеводів (0,37 г/100 см³) нами спостерігалось у 5 зразку, де концентрація дріжджів у посівному матеріалі була 50 г/дм³ м'ясного сусла. Зі зменшенням концентрації внесеного

продуценту в м'ясне сусло із 40 до 10 г/дм³ кількість незброжених вуглеводів відповідно зростала на 8,1; 21,6; 48,6 та 62,2%.

Отже, за концентрації дріжджів у посівному матеріалі 50 г/дм³ м'ясного сусла, в процесі ферментації найбільш повно метаболізуються вуглеводні компонент м'ясного сусла до моноцукридів, а далі перетворюються на етиловий спирт.

Важливе значення для активної ферментації вуглеводних компонентів м'ясного сусла дріжджами-продуцентами має нормування поживного середовища за Нітратним, фосфатним живленням із використанням ростових факторів (табл. 3.3-3.4).

Таблиця 3.3

Характеристика показників проферментованого м'ясного сусла

Показник	Дріжджі раси М-5
рН м'ясного сусла із популяцією дріжджів	5,12
рН по завершенню ферментації	4,81
Вуглекислий газ на 2 добу культивування, г	12,98
Концентрація етанолу, %об.	5,75
Вміст незаброжених цукрів, г/100 см ³	0, 82

Дані, наведені в табл. 3.3 вказують на те, що по закінченню ферментації м'ясного поживного середовища рН знизився на 0,31 одиницю із 5,12 до 4,81. За цей час утворилося 12,98 г вуглекислого газу, концентрація етилового спирту сягала 5,75 %об, а вміст незаброжених вуглеводів м'яси був на рівні 0,82 г/100 см³.

Однак, коли ми нормували поживне середовище (м'ясне сусло) компонентами Нітратного та Фосфатного живлення відповідно по 5 мг/дм³, а також додавали кукурудзяний екстракт в дозі 1%, то спостерігали значний приріст етилового спирту як цільового продукту (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Характеристика мелясного сусла після ферментації за умови нормування елементів живлення

Показник	Дріжджі раси М-5
рН мелясного сусла із популяцією дріжджів	6,88
рН по завершенню ферментації	4,12
Вуглекислий газ на 2 добу культивування, г	13,14
Концентрація етанолу, %об.	11,25
Концентрація загальних цукрів, г/100 см ³	0,42
Концентрація водорозчинних цукрів, г/100 см ³	0,31
Концентрація спирторозчинних цукрів, г/100 см ³	0,11

Після ферментації мелясного сусла, яке було додатково балансоване Нітратними та Фосфатними елементами живлення із додаванням ростових факторів, ми спостерігаємо значний приріст в ньому етилового спирту. За таких умов, коли продуценти забезпечені необхідними елементами живлення, синтез етанолу зріс у 1,95 рази із 5,75 %об до 11,25 %об, окрім того значно знизився вміст загальних цукрів до 0,42 г/100 см³, що на 48,8% є вищим за контроль.

3.3. Екологічна та економічна ефективність щодо удосконалених процесів виробництва біоетанолу

Удосконалення технологічних процесів у виробництві біоетанолу має ключове значення не лише для підвищення виходу продукту, а й для забезпечення його конкурентоспроможності та стійкості з екологічної точки зору. Сучасні технології спрямовані на зниження витрат, скорочення енергоспоживання, мінімізацію відходів та зменшення викидів парникових газів. Оцінка ефективності удосконалених процесів повинна включати як екологічні, так і економічні аспекти – ці два виміри взаємопов'язані та формують основу для прийняття рішень у біоенергетичній галузі.

Однією з головних переваг біоетанолу як альтернативного палива є здатність знижувати загальні викиди CO₂. Вдосконалення технологій, зокрема впровадження ферментації з високопродуктивними штамми дріжджів, використання відновлюваних джерел енергії на етапах переробки, а також рекуперація тепла дозволяють суттєво зменшити карбоновий слід біоетанольного виробництва.

Порівняно з традиційними методами, нові технологічні рішення зменшують викиди CO₂ на 20–50%, що особливо важливо в контексті зобов'язань країн щодо Паризької кліматичної угоди. Крім того, перехід до використання відходів біомаси (лігноцелюлозні субстрати) замість харчової сировини ще більше знижує загальне екологічне навантаження.

Традиційне виробництво біоетанолу характеризується значним водоспоживанням, що створює додаткове екологічне навантаження. Удосконалені системи рециркуляції води та біологічного очищення стоків дозволяють скоротити витрати води на одиницю продукції на 30–60%. Біоінженерні рішення щодо видалення залишків субстрату, органіки та залишкових ферментів дають змогу мінімізувати вплив на водні екосистеми.

Удосконалення технологій сприяє перетворенню побічних продуктів виробництва (барда, лігнін) на додаткові джерела енергії або добрив.

Наприклад, барду можна використовувати як корм для тварин або сировину для біогазових установок, що дозволяє закрити енергетичний цикл і зменшити кількість відходів.

Інноваційні методи гідролізу та ферментації дозволяють збільшити вихід біоетанолу з одиниці сировини на 15–40%. Це досягається за рахунок: використання ферментів із високою активністю; попереднього оброблення лігноцелюлозних матеріалів з полегшенням доступу ферментів; застосування гібридної ферментації (SSF – simultaneous saccharification and fermentation).

Зменшення втрат сировини, скорочення тривалості окремих етапів та зниження потреби в дорогих реагентах також сприяє зменшенню собівартості готового продукту.

Теплообмінники, багатоступенева дистиляція та впровадження ферментних методів дозволяють знизити енерговитрати до 20–30% у порівнянні з традиційними технологіями. У деяких випадках можливо досягти навіть енергетичної самодостатності підприємства за рахунок спалювання залишків лігніну або використання біогазу, отриманого з барди.

Удосконалення технологій дозволяє оптимізувати виробничі лінії під різні масштаби підприємств – від малих фермерських установок до великих біоенергетичних комплексів. Це підвищує інвестиційну привабливість біоетанольних проєктів як для держави, так і для приватних інвесторів.

Сучасні вдосконалені технології біоетанольного виробництва повністю відповідають принципам циркулярної економіки: максимальне використання ресурсів, зниження відходів, повторне використання побічних продуктів та зменшення викидів. Виробництво біоетанолу стає не просто джерелом палива, а частиною замкненого енергетичного циклу [43].

Інтеграція екологічних і економічних принципів у вдосконалені технології виробництва біоетанолу забезпечує не лише енергетичну незалежність та сталий розвиток, а й сприяє реалізації державної політики у сфері кліматичних змін. Використання інноваційних рішень та локальної

сировинної бази дозволяє сформувати ефективну модель біоекономіки з високим рівнем екологічної безпеки та економічної рентабельності.

Впровадження інновацій у біоетанольному виробництві – важлива складова глобального переходу до відновлюваних джерел енергії. Проте цей процес супроводжується низкою серйозних проблем і викликів, які охоплюють як технічні, так і економічні, екологічні та соціальні аспекти. У цьому розділі розглянемо основні бар'єри, що стримують ефективну інтеграцію новітніх технологій у виробництво біоетанолу, а також визначимо напрями, які потребують подальших досліджень та оптимізації.

Однією з головних технічних проблем впровадження нових технологій у біоетанольному виробництві є нерівномірна якість та склад сировини. Лігноцелюлозні відходи, енергетичні культури та побічні продукти сільського господарства мають неоднорідну структуру, різний вміст целюлози, геміцелюлози та лігніну, що ускладнює стандартизацію процесу гідролізу та ферментації. Це, в свою чергу, призводить до коливань у виході етанолу та зниження ефективності виробництва.

Також інтеграція нових ензимних систем та мікроорганізмів, що мають підвищену стійкість до інгібіторів гідролізу, стикається з обмеженнями через високі витрати на культивування та нестабільність у виробничих умовах. Наприклад, застосування генетично модифікованих штамів *Saccharomyces cerevisiae* або *Zymomonas mobilis* у промислових масштабах вимагає особливої інфраструктури та суворих біобезпекових стандартів.

Висока вартість впровадження нових технологій – один із найвагоміших бар'єрів. Це включає витрати на оновлення обладнання, реконструкцію виробничих ліній, навчання персоналу, сертифікацію нових технологічних рішень. Інноваційні процеси, зокрема ті, що передбачають застосування передобробки сировини (наприклад, вибуховий розпад, парова вибухова обробка, гідротермальні методи), потребують дорогих установок та

високої енергозатратності, що може знизити загальну економічну ефективність виробництва.

Крім того, нестабільність ринку біопалива, коливання цін на нафту, обмеження субсидій та регуляторні зміни створюють додаткові економічні ризики. Багато країн усе ще не мають ефективної законодавчої бази для підтримки інвесторів у сфері біоенергетики.

Хоча біоетанол вважається екологічно чистим паливом, процеси виробництва можуть спричиняти значне навантаження на довкілля, якщо не оптимізовані належним чином. Наприклад, деякі методи передобробки сировини утворюють токсичні сполуки (фурфурол, гідроксиметилфурфурол), що можуть потрапляти у воду чи повітря. Також слід враховувати високу потребу у водних ресурсах під час ферментації та охолодження, що може бути критичним у посушливих регіонах.

Незважаючи на науковий прогрес, низький рівень суспільної довіри до біотехнологій (особливо генетично модифікованих організмів) обмежує широке впровадження інноваційних рішень. Громадськість часто недооцінює потенціал біоетанолу як відновлюваного пального через міфи, пов'язані з конкуренцією з харчовою продукцією, енергетичним балансом тощо.

Також відсутність чітких стандартів і стимулів з боку держави щодо сертифікації нових технологій стримує впровадження наукових досягнень у виробничу практику. Часто підприємства уникають інновацій через складність проходження регуляторних процедур та відсутність гарантій повернення інвестицій.

Більшість інновацій у біоетанольному виробництві демонструють високу ефективність лише в лабораторних або пілотних масштабах. Проте при переході на промисловий рівень спостерігається зниження продуктивності, збільшення витрат та труднощі з адаптацією обладнання. Це вимагає подальших досліджень у сфері процесного моделювання, інженерії біореакторів та логістики постачання сировини.

Проблеми впровадження нових технологій у виробництво біоетанолу мають комплексний характер. Для їхнього подолання необхідна міждисциплінарна співпраця між біотехнологами, інженерами, економістами та політиками. Лише за умов формування сприятливого інноваційного клімату, підтримки наукових досліджень і створення чітких нормативних рамок можна забезпечити широке впровадження інновацій, що дозволить значно підвищити енергоефективність, екологічну чистоту та економічну доцільність біоетанольного виробництва.

Галузь виробництва біоетанолу є однією з найдинамічніших у сфері відновлюваної енергетики. У світлі зростаючого попиту на екологічно чисте паливо, глобальних зобов'язань щодо скорочення викидів парникових газів і пошуку альтернатив традиційним видам енергії, розвиток біоетанольної промисловості має значний стратегічний потенціал. У цьому розділі розглянемо ключові напрямки, що визначають перспективи подальшого розвитку галузі.

Однією з головних тенденцій є переорієнтація на нетрадиційні, дешеві та невичерпні джерела сировини. Замість харчової сировини (кукурудза, цукрова тростина) дедалі більше уваги приділяється: лігноцелюлозним відходам (солома, стебла кукурудзи, тирса); енергетичним культурам (міскантус, енергетична верба, топінамбур); побічним продуктам агропромислового комплексу; відходам харчової промисловості та органічним фракціям ТПВ.

Це дозволить знизити собівартість біоетанолу, зменшити навантаження на ґрунти та не конкурувати з харчовим сектором.

Подальший розвиток біоетанольної галузі залежить від впровадження ефективніших технологій ферментації та гідролізу. Серед перспективних напрямів: застосування генно-модифікованих мікроорганізмів, здатних перетворювати ксилозу, арабінозу та інші пентози в етанол; використання консолідованого біооброблення (CBP) – процесу, де гідроліз і ферментація відбуваються одночасно; створення мультиферментних комплексів, що

здатні розщеплювати складні полімери лігноцелюлози; підвищення толерантності мікроорганізмів до етанолу та інгібіторів.

Такі технологічні вдосконалення зменшують енергоспоживання, підвищують рентабельність та дозволяють адаптувати процес до різних видів сировини.

Біоетанольні заводи все частіше розглядаються не лише як виробники палива, а як частина комплексних біорефінерій, де з однієї сировини отримується низка цінних продуктів: етанол, біогаз, білкові концентрати, органічні кислоти, лігнін для біопластику, дигестат як добриво тощо [44].

Це забезпечує підвищення економічної ефективності, зменшення відходів і максимальне використання біомаси, що відповідає принципам циркулярної економіки.

Майбутнє галузі – за технологіями з мінімальним викидом вуглецю, оптимізованим споживанням води, енергії та хімікатів. Новітні підходи передбачають: використання сонячної або геотермальної енергії для підтримки температурного режиму; утилізацію побічних газів та тепла для потреб заводу; застосування мембранних технологій, іонного обміну та екологічних каталізаторів для очищення біоетанолу; вдосконалене поводження з дигестатом та залишками лігніну.

Інтелектуальні системи управління (SCADA, IoT, машинне навчання) дозволяють в режимі реального часу контролювати кожен етап виробництва, знижуючи ризики та втрати. Впровадження цифрових двійників технологічного процесу сприятиме точному прогнозуванню виходу продукції, оптимізації витрат і запобіганню аварій.

Зміцнення позицій біоетанолу можливе за умови підтримки з боку урядів – шляхом введення: обов'язкових квот на частку біопалива у транспортному секторі; податкових пільг; фінансування НДДКР у галузі біоенергетики; створення міжгалузевих кластерів із залученням аграріїв, науковців, інвесторів та енергетичних компаній.

Міжнародні ініціативи, як-от Green Deal (ЄС), Clean Energy Transition (США), сприяють глобалізації ринку біоетанолу та інтеграції виробників у світову зелену економіку.

Біоетанол уже сьогодні є ключовим компонентом у бензинових сумішах (E10, E85, EN 15376) (табл. 3.5). Зі збільшенням екологічних вимог до транспорту він стане важливим перехідним джерелом енергії до повного переходу на електротранспорт. Крім того, досліджується застосування біоетанолу в авіаційній та морській галузях як компонента альтернативного палива

Таблиця 3.5

Фізико-хімічні вимоги щодо біоетанолу як компоненту моторного палива EN 15376 [45].

Найменування показника	Значення
Зовнішній вигляд	Однорідна прозора рідина від безбарвного до світло-жовтого кольору, що не містить механічних домішок
Об'ємна доля етилового спирту, %, не менше	92,1
Об'ємна доля метилового спирту, %, не більше	0,5
Масова доля води, %, не більше	1,0
Масова концентрація смол, що промиті розчинником, мг/дм ³ , не більше	50
Об'ємна доля денатуруючих добавок, %, в межах	1,0 – 5,0
Показник активності водневих іонів, рН, в межах	6,5 – 9,0
Масова концентрація хлор-іонів, мг/дм ³ , не більше	32
Масова частка сірки, %, не більше	0,003
Масова частка міді, мг/кг, не більше	0,1

Економічна ефективність виробництва біоетанолу визначається не лише технологічними параметрами, а й ринковими умовами, державним регулюванням, інвестиційною привабливістю та доступністю інфраструктури. Аналіз існуючих технологічних рішень показує, що впровадження інноваційних підходів сприяє зниженню собівартості палива, підвищенню прибутковості підприємств і розвитку експортного потенціалу.

Однак для масового впровадження необхідне комплексне державне стимулювання, сприяння науково-дослідним роботам та формування позитивного інвестиційного клімату.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Проаналізовано сировинний потенціал для виробництва біопалива II покоління, раси дріжджів-продуцентів та сучасні розробки безвідходних технологій одержання етилового спирту на відходах виробництва цукру – мелясі.

2. Подано опис основних стадії технологічного процесу одержання етилового спирту на м'ясному субстраті та розраховано матеріальні затрати цього виробництва. Вибрано ферментер для культивування дріжджів-продуцентів, визначені оптимальні точки контролю ферментації та опрацьовано можливості автоматизації окремих ланок.

3. Удосконалення технологій виробництва біоетанолу є не лише науково-технічним, а й соціально-економічним пріоритетом, який відповідає глобальним викликам і спрямований на збереження природних ресурсів для майбутніх поколінь.

4. На основі експериментальних досліджень було встановлено, що найвищий приріст біомаси дріжджів спостерігався культивування м'ясного суслу із початковим вмістом дріжджів-продуцентів 50 мг/дм^3 . За таких параметрів культивування приріст біомаси був на рівні 86 мг/дм^3 , що в 1,7 рази перевищував її до початку ферментації; вміст етанолу складав 9,7 %об, що на 17,5% та 36,1% перевищував відповідні показники при використанні 40 г/дм^3 та 30 г/дм^3 , а вміст гліцеролу, знизився на 15,2%.

Після ферментації м'ясного суслу, яке було додатково балансоване Нітратними та Фосфатними елементами живлення із додаванням ростових факторів, синтез етанолу зріс у 1,95 рази із 5,75 %об до 11,25 %об, окрім того значно знизився вміст загальних цукрів до $0,42 \text{ г/100 см}^3$, що на 48,8% є вищим за контроль.

5. Слід відзначити, що удосконалення окремих ланок технологічного процесу виробництва етилового спирту є стратегічно важливим завданням для забезпечення енергетичної безпеки та екологічної стабільності. Сучасні наукові досягнення та інновації створюють міцну основу для подальшого

розвитку галузі, що має високий потенціал для масштабування та інтеграції у світову енергетичну систему.

6. Перспективи розвитку виробництва біоетанолу ґрунтуються на інноваціях, екологічній безпеці, диверсифікації сировини та державній підтримці. При збереженні позитивної динаміки інвестицій і наукових досліджень, галузь має всі шанси стати важливою складовою енергетичної незалежності, екологічної стабільності та економічного зростання країн, що активно розвивають відновлювану енергетику.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

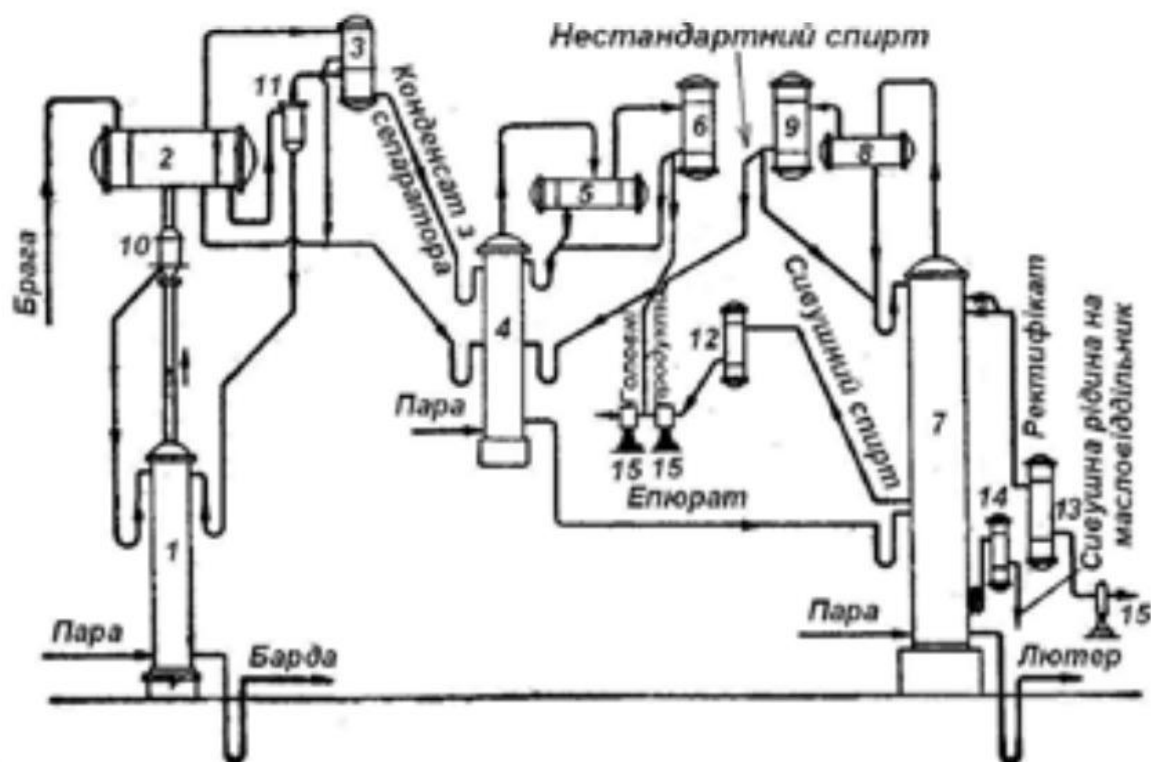
1. Желєзна Т. А., Драгнєв С. В. Поточний стан та перспективи розвитку ринку біоетанолу і біодизелю в Україні// Енергетика і автоматика, №4 2023. С.153-162. DOI 10.31548/energiya4(68).2023.153
2. Коломієць Т. В. Розвиток виробництва біопалива в Україні під час військового стану. Економіка та суспільство. 2024. №63. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-63-5>
3. Виробництво і використання біопалив в агроєкосистемах. Механіко-технологічні основи: монографія / Голуб Г.А., Кухарець С.М., Чуба В.В., Марус О.А. К.: НУБіП України, 2018. 254 с.
4. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року / О. Дячук, М. Чепелєв, Р. Подолець, Г. Трипольська та ін.; за заг. ред. Ю. Огаренко та О. Алієвої. Київ: Вид-во ТОВ “АРТ КНИГА”, 2017. 88 с. https://ua.boell.org/sites/default/files/perehid_ukraini_na_vidnovlyuvanu_energetiku_do_2050_roku.pdf
5. Долинский А. А., Ободович А. Н. Реалії сьогодення та перспективи виробництва біоетанолу як компонента сумішевих палив. Вісник НАН України. 2019. № 11. С. 29–37. <https://doi.org/10.15407/visn2019.11.029>.
6. Голуб Г. А. Ефективність функціонування багатoproфільного сільськогосподарського підприємства [Текст] / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець // Наук. вісн. НУБіП України. Сер. Техніка та енергетика АПК. 2015. Вип. 212, ч. 2. С. 35-44
7. Калетнік Г.М. Виробництво та використання біопалив в Україні: економетричні підходи, моделювання / Г.М. Калетнік, Н.В. Буреннікова, Н.А. Потапова // Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики. 2018. № 9. С. 7–23.
8. Марченко В. М., Кіт А. В. Аналіз потенціалу виробництва біоетанолу з цукрових буряків в Україні. Агросвіт. 2018. № 22. С. 21–27

9. Бабич І.М., Бойко П.М., Бондар М.В. Технологічні та економічні аспекти виробництва спирту етилового різного цільового призначення // Наукові праці / Одеська національна академія харчових технологій. Одеса, 2021. Випуск 85, Том 2. С. 77–83.
10. Bioethanol Production from Food Waste Applying the Multienzyme System Produced On-Site by *Fusarium oxysporum* F3 and Mixed Microbial Cultures / G. Prasoulas et al. *Fermentation*. 2020. Vol. 6, no. 2. P. 39
11. Ганженко О.М., Хіврич О.Б., Дубовий Ю.П., Сенчук С.М., Саєнко П.І., Зиков П.Ю. Строки збирання буряків цукрових – як важливий фактор в технології їх вирощування для виробництва біоетанолу. *Біоенергетика/Bioenergy*. 2019. №2 (14). С. 13-15.
12. Фурман І. Перспективи виробництва біогазу та біоетанолу на спиртових заводах. *Економіка та суспільство*. 2022. 36. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-36-42>
13. New Technologies for Bioethanol Production: Patents and Innovation / S. G. Karp et al. *Biofuel and Biorefinery Technologies*. Cham, 2022. P. 489–515
14. Польська фірма пропонує використання соломи в якості джерела енергії. URL: <http://www.biowatt.com.ua/novosti/polska-firma-proponuye-vikoristannya-solomi-v-yakosti-dzherela-energiyi>
15. Фурман І.В., Ратушняк Н.О. Перспективи виробництва біопалив в умовах реформування земельних відносин. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2021. № 3(57). С. 53–68. DOI: <https://doi.org/10.37128/2411-4413-2021-3-4>
16. ДСТУ 7166:2010. Біоетанол. Технічні умови. Чинний від 2011-01-01. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарту України, 2010
17. Зброджування суслу підвищеної концентрації з крохмалевмісної сировини С.Т. Олійнічук, Т.І. Лисак, О.О. Коваль. *Продовольчі ресурси: збірник наукових праць / НААН; Ін-т прод. Ресурсів НААН* 2016. №7 ст. 139-143.

18. Коваль О.О. Розробка інноваційної технології біоетанолу з продуктів переробки цукрових буряків: дис. ...канд. техн. наук: 05.18.05. Ін-т прод. Ресурсів НААН України. Київ, 2021. 130 с
19. Дубровін В., Голуб Г. Біодизель та біоетанол / ред. С. Щербак. Київ : Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України, 2015. 51 с
20. Ковіна О. Характеристика меляси як сировини для спиртового і дріжджового виробництва. Приймання, зберігання. Одеса, 2015.
21. Технології та засоби перетворення відновлюваних джерел енергії для приватних домогосподарств: монографія / С. В. Галько, В. Я. Жарков, А. В. Жарков. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. 215 с.
22. Коваль О., Олійнічук С. Вплив нецукрів меляси на ефективність зброджування суслу з цукровмісної сировини. Вісник аграрної науки. 2019. Т. 97. № 3. С. 63-68. DOI: [org/10.31073/agrovisnyk201903-10](https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201903-10).
23. Бухкало С. І., Ольховська О. І., Ольховська В. О., Зіпунніков М. М. Дослідження та аналіз інноваційних заходів з технології комплексної утилізації післяспиртової барди. Вісник Національного Технічного Університету "ХПІ". Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. 2019. № 15. С. 66-73. doi: [10.20998/2220-4784.2019.15.12](https://doi.org/10.20998/2220-4784.2019.15.12).
24. Спиртова промисловість: традиції та інновації. Вітчизняний та світовий досвід [Електронний ресурс]: наук.-допом. бібліогр. покажч. / [упоряд. О. В. Олабоді] ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. Київ, 2019. 123 с.
25. Пришляк Н. В., Паламаренко Я. В., Березюк С. В. Стратегічне управління інноваційним розвитком взаємопов'язаних галузей з виробництва біопалива. Вінниця: ТОВ «ДРУК», 2020. 404 с
26. Бондаренко, В. І., & Ковальчук, І. П. (2019). Біотехнології у виробництві біоетанолу: сучасний стан та перспективи. *Вісник Біотехнології України*, 2(35), 15–27.

27. Гнатюк, С. М., & Литвин, О. В. (2020). Вплив технологічних параметрів на ефективність виробництва біоетанолу. *Енергетика та Екологія*, 7(4), 43–52.
28. Дорошенко, І. В. (2018). Використання аграрних відходів у виробництві біоетанолу. *Аграрна Наука*, 3, 67–75.
29. Іваненко, В. М., & Петровська, Н. І. (2021). Інновації у ферментації біоетанолу: генетичні методи. *Біотехнологічний журнал*, 4(12), 102–112.
30. Ковальчук, А. М. (2017). Сировинні ресурси для виробництва біоетанолу в Україні. *Сільське Господарство*, 10, 12–19.
31. Кузнєцова, Л. П. (2019). Технологічні аспекти виробництва біоетанолу. *Паливна Енергетика*, 1, 33–41.
32. Sathitsuksanoh, N., & Zhang, Y.-H. P. (2012). Processive Cellulases and Their Synergism in Lignocellulose Degradation. *Bioresource Technology*, 109, 176–183.
33. Smith, C. M., & Brown, R. C. (2014). Cellulosic Biofuels: An Overview. *Current Opinion in Biotechnology*, 29, 123–129.
34. Литвиненко, П. С. (2020). Екологічна оцінка біоетанольного виробництва. *Екологія і Виробництво*, 6(3), 78–87.
35. Мельник, Ю. І. (2018). Ферментація та її роль у біотехнологіях. *Журнал Біотехнології*, 5, 23–30.
36. Li, H., & Zhang, X. (2016). Progress in Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulosic Biomass. *Biofuels*, 7(3), 233–240.
37. Нечипорук, О. В. (2019). Біоетанол як альтернативне паливо: технології та перспективи. *Енергетика України*, 4, 45–54.
38. Олійник, Т. П. (2021). Використання генетично модифікованих організмів у виробництві біопалива. *Наукові Записки НУБіП України*, 198(2), 59–68.
39. Петренко, Г. Д. (2020). Сучасні технології у виробництві біоетанолу. *Біотехнологія і Харчова Промисловість*, 7(1), 15–25.

40. Романенко, В. І. (2017). Аналіз ефективності біоетанольних виробництв. *Економіка АПК*, 9, 52–60.
41. Савченко, І. В. (2018). Методи покращення ферментації біоетанолу. *Журнал Агробіотехнологій*, 3(15), 48–57.
42. Taherzadeh, M. J., & Karimi, K. (2007). Enzyme-Based Hydrolysis Processes for Ethanol from Lignocellulosic Materials: A Review. *BioResources*, 2(4), 707–738.
43. Тарасенко, О. М. (2019). Перспективи розвитку біоетанолу в Україні. *Вісник Аграрної Науки*, 12, 29–39.
44. Шевченко, М. В. (2021). Автоматизація технологічних процесів у виробництві біоетанолу. *Техніка і Енергетика АПК*, 4, 85–93.
45. Mohagheghi, A., Lewis, R. S., Zhang, M., & Tucker, M. (2006). Production of Fuel Ethanol from Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulosic Biomass: Status and Technical Challenges. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 129-132, 496–508.



Принципова схема брагоректифікаційного апарату
для одержання біоетанолу

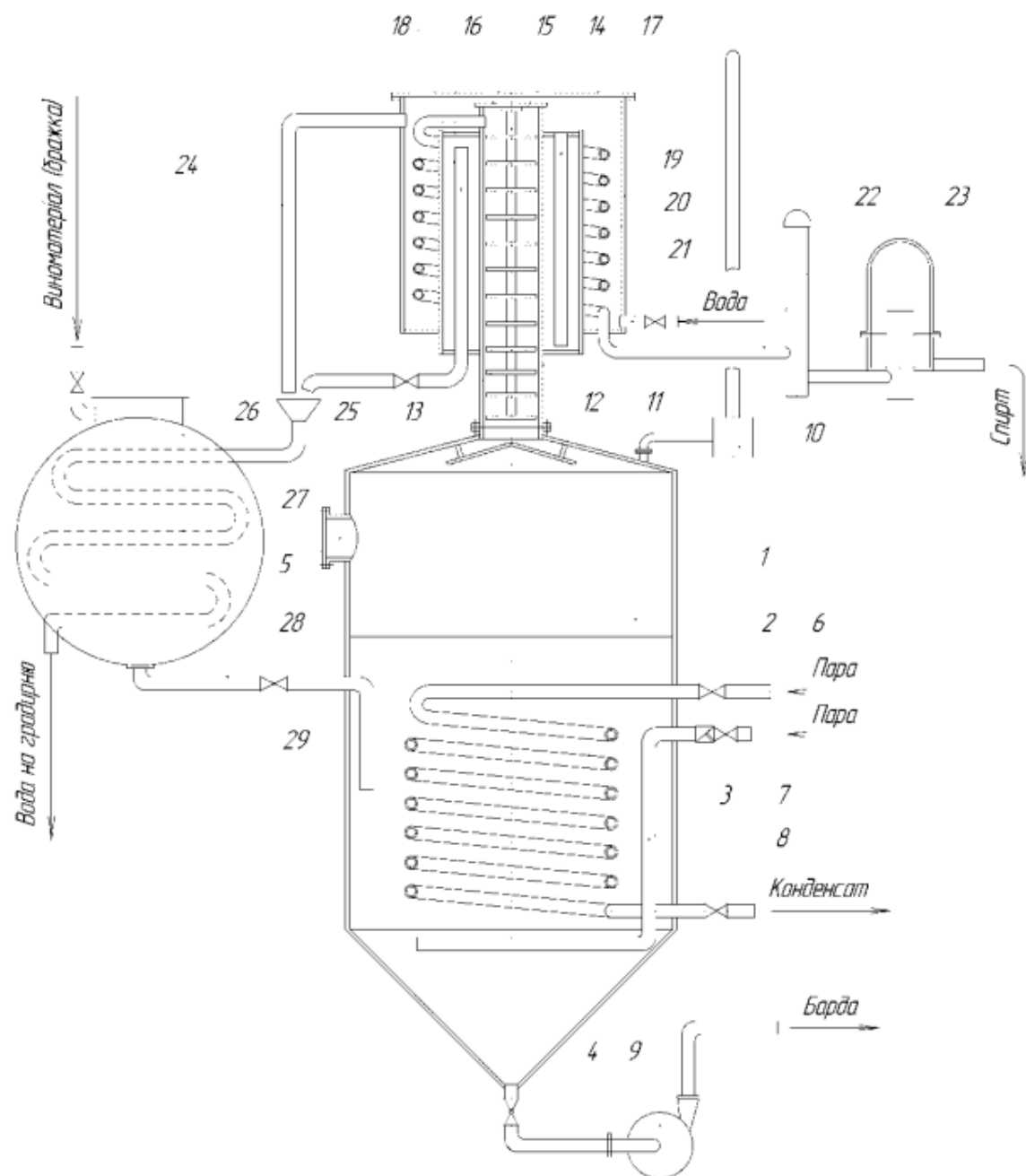


Схема установки для виробництва спирту-сирцю шляхом перегонки

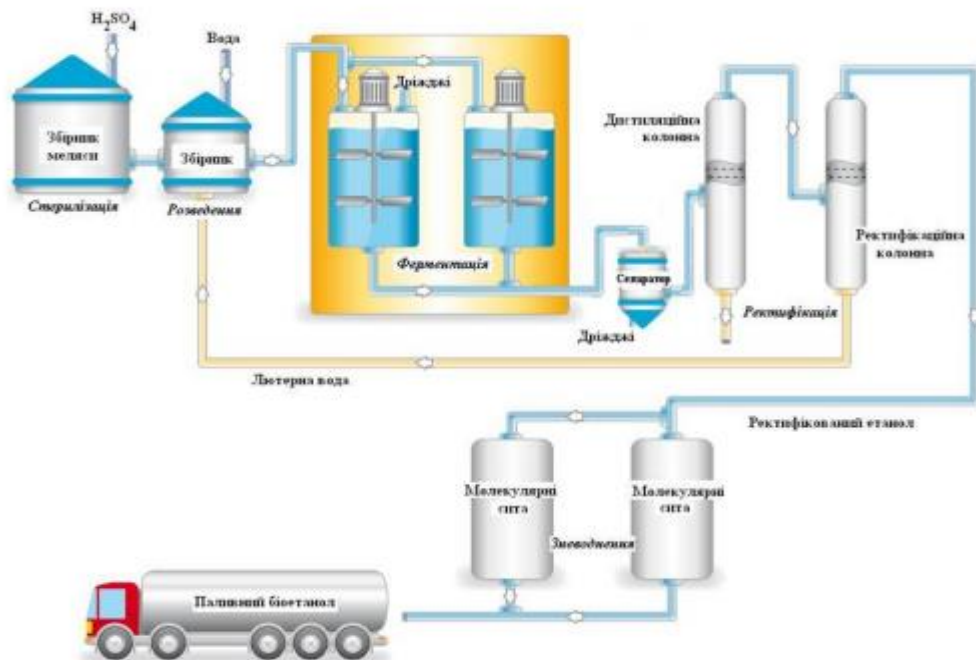


Схема одержання технічного етилового спирту (біоетанолу) у процесі ферментації меля