

ЗАТВЕРДЖЕНО  
Наказ Міністерства освіти і науки,  
молоді та спорту України  
29 березня 2012 року №384

Форма № Н-9.02

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 бакалавра

на тему: “ Біотехнологія виробництва та використання

біоетанолу як альтернативного джерела енергії”

Виконав: студент 4 курсу, групи 2  
спеціальності

162 «Біотехнологія та біоінженерія»

**Крупач Роман Миколайович**

(прізвище та ініціали)

Керівник: **проф.Музика В. П.**

(прізвище та ініціали)

Рецензент: **доц. Періг Д.П.**

(прізвище та ініціали)

Робота заслухана на засіданні кафедри біотехнологій та радіології і  
рекомендована до захисту в ДЕК, протокол № 25 від 01.06 2023 р.

Завідувач кафедри біотехнологій та радіології



проф. Василь БУЦЯК

Львів – 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО  
Наказ Міністерства освіти і  
науки, молоді та спорту України  
29 березня 2012 року № 384  
Форма № Н-9.01

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 бакалавр  
(цифр і літер)

Спеціальність 162 «Біотехнології та біоінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
завідувач кафедри, голова циклової  
комісії А. Буцяк В.І.  
“ 09 ” 02 2023 року

### ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

**Крупач Роман Миколайович**  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема бакалаврської роботи “Біотехнологія виробництва та використання біоетанолу як альтернативного джерела енергії”  
Керівник бакалаврської роботи

**Буцяк В.І. д. с.-г.н., проф.**  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 06.01.2023 року №31-4

2. Строк подання бакалаврської роботи 10.05.2023 року

3. Вихідні дані до бакалаврської роботи

Вихідні матеріали до виконання роботи: поновлювальна енергетика, меляса, сировина для одержання біоетанолу, ректифікаційна колона, дріжджі, сусло, дріжджегенератор, бродіння, апаратурно-технологічна схема виробництва біоетанолу.

4. Зміст бакалаврської роботи (перелік питань, які потрібно розробити) вступ, огляд літератури, матеріал та методи досліджень, результати власних досліджень, висновки, список використаної літератури та додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, графіки, діаграми, рисунки, технологічні схеми, технологічні лінії), рисунки: структура споживання енергії в світі, основні напрями виробництва біопалива, джерела отримання біоетанолу та способи утворення, Узагальнена технологія виробництва біоетанолу, ключові переваги виробництва біоетанолу, найбільш популярна сировина в Україні для виробництва біоетанолу, характеристика технологій переробки меляси і злакових на біоетанол; схеми: уведення ферментних препаратів, бродильний апарат, технологічна карта зброджування меляси одно потоковим способом, апаратурно-технологічна схема зброджування меляси одно потоковим способом, Виробництво харчового етилового спирту за технологією "сухого" способу, Виробництво паливного етилового спирту (біоетанолу) за технологією "мокрого" способу, технологічні особливості переробки клітковини в етиловий спирт паливного призначення.

6. Консультанти розділів бакалаврської роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.02.2023 року

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання	примітка
1.	Літературний огляд.		
	I атестація:	10.04.23р.	30%
2.	Методика експерименту та основні методи досліджень.		20%
3.	Експериментальна частина.		35%
	II атестація:	20.04.23р.	55%
5.	Висновки		5%
	III атестація:	02.05.23р.	15%
	Допущено до захисту.	10.05.23р.	100%

Здобувач

Крупач Роман Миколайович

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Буцяк В.І. д.с.-г.н., проф.

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	3
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	8
1.1. Біоетанол як альтернативне поновлюване джерело енергії	8
1.2. Сировина, яка використовується для виробництва біоетанолу	16
1.3. Основні підприємства України, що виробляють біоетанол	25
РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	28
2.1. Апаратурне забезпечення технологічного процесу переробки меляси в біоетанол	28
2.2. Матеріал і методи	36
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	38
3.1. Сучасні технології одержання біоетанолу	38
3.2. Особливості ферментації субстрату з відходів кукурудзи продуцентами біоетанолу	42
ВИСНОВКИ	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	47
ДОДАТКИ	51

## АНОТАЦІЯ

Робота написана на 52 сторінках комп'ютерного тексту. Складається із 3 розділів, вступу, висновку, списку використаної літератури та додатків. Містить 22 рисунки, 3 таблиці, 32 джерела використаної літератури.

**Ключові слова:** поновлювальна енергетика, меляса, сировина для одержання біоетанолу, ректифікаційна колона, дріжджі, сусло, дріжджегенератор, бродіння, апаратурно-технологічна схема виробництва біоетанолу.

На основі даних літератури та інтернет ресурсу проведений аналіз вітчизняним та зарубіжним технологіям виробництва паливного етилового спирту (біоетанолу). Розглянуто проблему альтернативних джерел енергії. Подана характеристика технологічним параметрам культивування дріжджів – продуцентів біоетанолу та сировині, яка використовується в даних технологіях. Розглянуто апаратурне забезпечення технологічного процесу переробки меляси в біоетанол.

Проаналізовано технологічні особливості одержання етилового спирту паливного призначення із клітковини та інших органічних відходів АПК. Встановлено, що експериментальний штам дріжджів у виробничих умовах забезпечував вищий вміст спирту в бражці на 6,5%, за рахунок зменшення накопичення гліцеролу. Отримані результати свідчать про доцільність заміни сухих дріжджів закордонної селекції експериментальним штамом.

**Об'єкт дослідження** – меляса, штами дріжджів, технологічні параметри та субстрати для культивування.

**Предмет дослідження** – виробництво паливного етилового спирту на відходах кукурудзи за використанням різних штамів дріжджів.

**Мета досліджень** – аналіз й узагальнення інформації щодо сучасного стану виробництва біоетанолу, вплив режимів культивування та продуцентів на оптимізацію технологічного процесу.

Відповідно до мети вирішувались наступні **завдання**:

– проаналізувати доступну літературу та інтернет ресурси щодо узагальнення інформації про сировинний потенціал та мікроорганізмів-продуцентів біоетанолу;

- ознайомитись із технологічними особливостями біосинтезу біоетанолу на мелясі як основному субстраті;

- подати опис апаратурно-технологічної схеми виробництва біоетанолу при спиртовому зброджуванні м'ясяного суслу в періодичному і безперервному процесах.

- дослідити технологічні особливості субстрату з відходів кукурудзи в умовах переробки продуцентами біоетанолу;

- вивчити вплив режимів культивування та різних штамів дріжджів на оптимізацію технологічного процесу одержання паливного етанолу на відходах кукурудзи.

**Актуальність теми.** Кваліфікаційна робота написана на актуальну тему, вона присвячена дослідженню технологічних аспектів щодо сировинної бази та продуцентів відновлювального джерела енергії – біоетанолу. Цілком зрозуміло, що даному напрямку, в недалекій перспективі буде прикута увага науковців та виробничників як в економічному (енергетичному), так й екологічному плані.

Викопні джерела енергії вичерпуються, і стає необхідним поступово їх замінювати поновлювальними джерелами. Саме таку роль повинен виконати біоетанол та інші відновлювальні джерела. Тому дуже важливим є розробляти та удосконалювати технології виробництва біоетанолу. Шукати нові, нетрадиційні сировинні ресурси, здебільшого на основі клітковини та

інших органічних відходів АПК, а також селекційних продуцентів (дріжджів), що дасть можливість запроваджувати ресурсо- та енергозберігаючі технології

***Науковий внесок роботи.*** Виробництво біоетанолу із меляси на теренах Західної України можна вважати доцільним та економічно вигідним, перш за все через близьке розташування сировинної бази.

***Практична цінність роботи.*** Шляхом експериментальних досліджень було встановлено, що експериментальний штам дріжджів у виробничих умовах забезпечував вищий вміст спирту в бражці на 6,5%, за рахунок зменшення накопичення гліцеролу. Отримані результати свідчать про доцільність заміни сухих дріжджів закордонної селекції експериментальним штамом.

## ВСТУП

Актуальність роботи. У зв'язку із виснаженням запасів та неухильним зростанням цін на нафту й, через це, зростаючу необхідність пошуку її альтернативи із середини ХХ ст., збільшилась увага, направлена на розроблення нових технологій одержання джерел енергії.

З метою повноцінної заміни традиційного джерела енергії потрібно, аби нові джерела вирізнялися в першу чергу поновлюваністю. Разом із такими поновлюваними джерелами енергії, як енергія вітру, сонячна енергія, приливно-відливних течій та іншими, на особливу увагу заслуговує застосування продуктів фотосинтезу. Його суттєвою перевагою перед викопним паливом окрім поновлюваності виступає екологічна безпека. Так, якщо в складі вихлопних газів викопного палива знаходиться більше 300 сполук, які завдають шкоди навколишньому середовищу, то в процесі згоряння продуктів фотосинтезу атмосфера не забруднюється шкідливими сполуками, а кількість виділеного вуглецю не перевищує витраченого на утворення біомаси, яка перероблена на паливо.

У вигляді основного поновлюваного біопалива у Європі розглядається біодизель, а в Сполучених Штатах Америки – біоетанол. Оцінка нинішнього стану біотехнології виробництва біодизеля вказує на те, що його популярність пояснюється такими об'єктивними причинами, як можливість масштабувати процес його напрацювання у ферментерах без залучення до процесу потенційно продуктивних земель, до того ж деякими фізико-хімічними показниками, в тому числі, вищою температурою займання, інакше кажучи вищою безпекою. Однак вважається, що найбільшим потенціалом володіє паливний біоетанол, котрий характеризується безмежними джерелами його одержання. Ними можуть виступати як різна рослинна сировина, так й відходи деревообробної промисловості і сільського господарства. Велика перспективність застосування його як екологічно чистого палива, до того ж сировини для хімічної промисловості, сприяла різкому збільшенню у ряді країн фінансових



витрат на відповідні програми. В наш час уже більше половини світового виробництва етанолу застосовується у вигляді добавки до палива для двигунів внутрішнього згоряння (бензину) та тільки близько 15% – для виробництва алкогольних напоїв [25].

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1. Біоетанол як альтернативне поновлюване джерело енергії

Суттєвий внесок в розвиток теоретико-методологічних аспектів виробництва і споживання біологічних видів палива зробили такі українські науковці: В. Мироненко, В. Гавриш, М. Мельничук, Я. Гуков, А. Магомедов, Л. В. Гуцаленко, Н. Кудрицька, В. Ю. Фабіянська, Г. М. Калетнік, В. Давий, Г. Калетнік, В. Дубровін й багато інших.

Проблеми розвитку ринку біопалива знайшли відображення в роботах таких науковців як: П.Т. Саблук, В.Г. Андрійчук, С.М. Кваша, В.І. Бойко, І.Г. Кириченко, Г.М. Калетнік, В.П. Галушко й інших.

Необхідно відзначити суттєвий внесок Г. М. Калетніка в дослідження питання біопалив, у тому числі у власній монографії «Розвиток ринку біопалив в Україні» вчений систематизував організаційно-економічні та науково-методичні основи формування ринку біопалив, створення і розвитку ринку енергетичних культур, котрі застосовують у вигляді сировини при виробництві біопалива, техніко-технологічні характеристики виробництва біопалива із сировини рослинного походження, до того ж економічну оцінку їх використання агропромисловим комплексом. Науковцем було здійснено узагальнення світових тенденцій розвитку ринку біопалива із сировини рослинного походження, здійснено економічне обґрунтування перспектив подальшого розвитку вітчизняного ринку біопалива [11].

У власному навчальному посібнику «Біопаливо: ефективність його виробництва та споживання в АПК України» автор висвітлив організаційно-економічні, науково-методичні засади виробництва і застосування біопалива й інших видів нетрадиційних джерел енергії. Дослідником було здійснено узагальнення світових тенденцій розвитку біопалива із рослинної сировини, паралельно із тим було враховано потенціал рослинної сировини, який є наявним у вітчизняних агровиробників, екологічність застосування цього типу палива, його конкурентоздатність й економічність останнього на світовому паливному ринку [12].

Біотехнології в енергетиці представляють технології, одержані у промислових масштабах енергії із різних видів відновлюваної сировини біологічного походження (газоподібного, твердого та рідкого біопалива). Біомаса існує у вигляді цілої низку форм, на кшталт, волога чи тверда біомаса, цукор та рослинна олія. Усю цю сировину можливо перетворювати у цінний енергетичний продукт, застосовуючи біологічні, термічні і хімічні процеси. Згідно із М. Ю. Мироненко, пропонується класифікувати біомасу та біоенергетичні джерела в залежності від їх кінцевого призначення:

- рідкі біопалива: метил, рослинні олії, складний ефір (чи біодизель) можуть застосовувати як в суміші із дизелем, так й у чистому вигляді;
- виробництво електричної енергії та когенерація електричної і теплової енергії;
- рідкі та тверді залишкові продукти нерідко застосовуються у якості добрив на фермах;
- біогаз, котрий отримується внаслідок анаеробного зброджування, здебільшого застосовується у процесах когенерації;
- виробництво тепла [16, с. 26-27].

В наш час в усьому світі мають місце глобальні зміни в структурі виробництва енергії. Такі тенденції вже спричинили те, що на сьогоднішній день частка різних видів біопалива у загальному обсязі споживання енергії складає понад 14% (рис. 1.1).

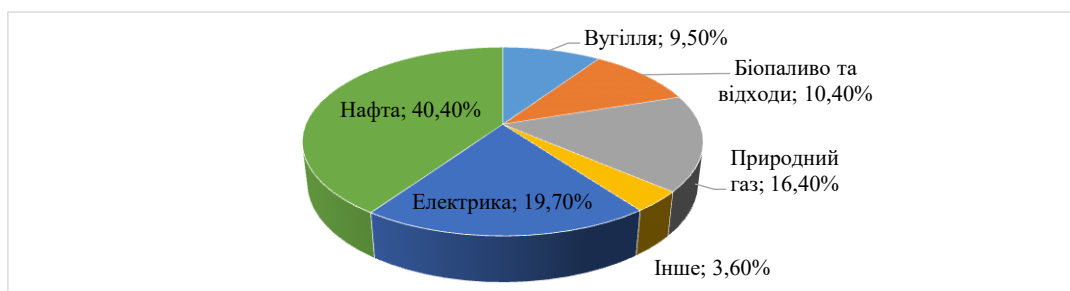


Рис. 1.1. Структура споживання енергії в світі (2019 р.) [25]

В сільському господарстві 19% цукрової тростини, 17% врожаю кукурудзи і 13% виготовленої рослинної олії спрямовуються на виробництво біопалива [10].

Біологічне паливо чи біопаливо (англ. biofuels) являє собою органічні матеріали, такі як спирти, відходи і деревина, які застосовуються для виробництва енергії. Це є поновлюваним джерелом енергії, на відміну від інших природних ресурсів, таких як вугілля, ядерне паливо та нафта. Офіційне визначення біопалива звучить наступним чином «паливо мінімум із 80% вмістом (за об'ємом) матеріалів, одержаних від живих організмів, зібраних у межах десяти років перед виробництвом» [21 с. 173].

Біопаливо представляє продукт із високою доданою вартістю. Випуск такого виду палива вирішує одразу декілька завдань, які стоять перед сільгосптоваровиробниками: дозволяє ефективно переробляти некондиційну продукцію і відходи сільгоспвиробництва; розширює ринок збуту; дає змогу підвищити загальну рентабельність виробництва [10, с. 29].

Біопаливо виробляється внаслідок термічної обробки органічних сполук (біомаси) без доступу повітря, так званого піролізу. Як біомасу прийнято визначати усі органічні речовини як тваринного, так й рослинного походження, джерелом котрих слугує нині існуюча біосфера нашої планети [13, с. 37].

Терміном «біопаливо» охоплюються усі види рідкого чи транспортного палива, котрі виробляють із біомаси. Форми біомаси для її застосування як біопалива являються доволі різноманітними. Біомаса, у вигляді енергетичного ресурсу може мати кілька напрямів застосування: її можливо спалювати (у вигляді гранул, тирси, паливних брикетів, деревини), переробляти в рідкі біопалива (біодизель, біоетанол), до того ж виготовляти біогаз [9, с. 169].

В. І. Гавриш, здійснюючи дослідження проблеми розвитку виробництва і споживання біологічних палив у нашій країні, зробив класифікацію альтернативних видів палива, в тому числі: рідкі (для бензинових двигунів і для дизельних двигунів) та газоподібні (штучні і природні) [6, с. 57].

На думку Т. В. Скворцової, А. І. Горової, А. В. Павличенко, С. М. Лисицької доцільним є класифікувати біопаливо на біодизель, біогаз, біоетанол, і тверде паливо (рис. 1.2).

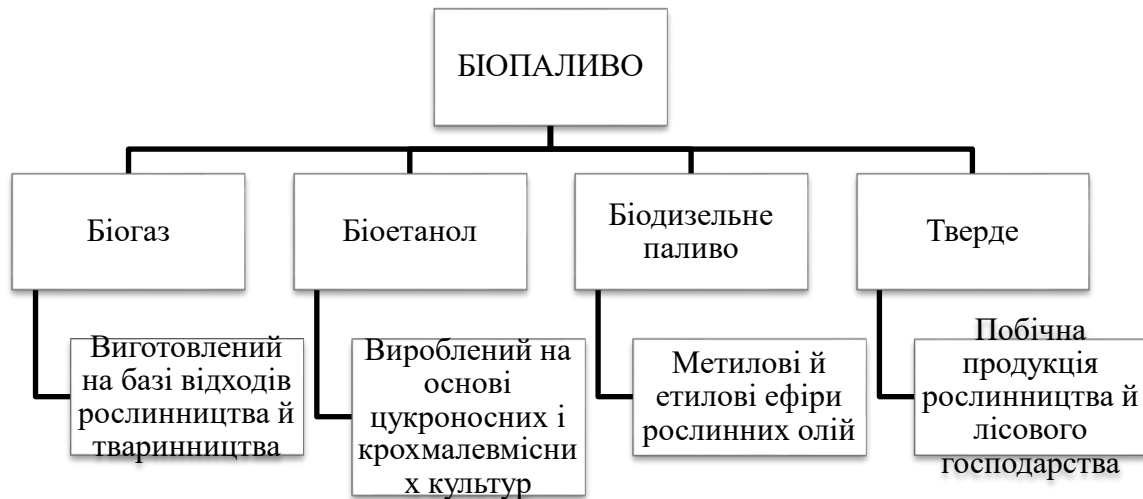


Рис. 1.2. Основні напрями виробництва біопалива [4, с. 93]

Розглянемо визначення біоетанолу. «Біоетанол – це спирт етиловий зневоджений, виготовлений із біомаси чи спирту етилового-сирцю задля використання як біопалива» [17, с. 12].

«Біоетанол являє собою обезводнений етиловий спирт із супутніми домішками, октанове число – 106, вироблений із біомаси й/або біологічно розкладних компонентів. Застосовується у якості кисневмісної присадки до дизеля, бензину чи як біологічно відновлюваний альтернативний замітник бензину» [3].

Відповідно до С. О. Поляшенка зазначається, що біоетанол представляє «безводний високооктановий етиловий спирт (октанове число складає 105), одержаний в ході переробки рослинної відновлювальної сировини, методом ферментації цукрів мікроорганізмами, котрий застосовується у якості моторного палива (містить не менше 99% етилового спирту)» [18, с. 157].

Згідно із Л. В. Гуцаленко, В. Ю. Фабіянською зазначається, що біоетанол являє собою етиловий спирт для бензинових двигунів, котрий

отримують завдяки ферментації цукру (цукрова тростина, цукровий буряк) чи крохмалю (кукурудза, пшениця) [9, с. 172].

Метою використання біоетанолу є поступове заміщення реактивного і моторного палива, яке виробляється із мінеральної сировини – вугілля, газу, нафти. У вигляді моторного палива біоетанол виступає перспективним екологічним трендом №1. Біоетанол нейтральний у якості парникових газів. Скорочує викиди на 75% в порівнянні із мінеральним паливом. У 2020 році у світі вироблено 110 млн м<sup>3</sup>. Демонструє щорічний ріст 7%. Заміщує у світі вже 11% бензинів. План заміщення до 2030 року становить 14% [3].

Досліджувана сполука представляє безбарвну малотоксичну рідину, котру можливо одержати із природних полісахаридів. Застосування біоетанолу у чистому вигляді для заправки транспорту вимагає реконструкції двигуна із заміною елементів паливної системи на вузли, які виготовляються із нержавіючої сталі і стійкого пластику. Суміш біоетанолу та бензину у співвідношенні 10/90% чи 20/80% не шкодить системам автомобіля та дозволяє застосовувати біоетанол вже за наявних технологій. В Сполучених Штатах Америки існують автомобілі, які працюють на суміші біоетанолу та бензину у співвідношенні 85/15%. Бензин із домішкою біоетанолу насичується киснем, що у свою чергу забезпечує більш повне згоряння та зменшення викиду вуглекислого газу. Продукти розпаду біоетанолу не шкодять навколишньому середовищу [17].

Для біоетанолу і сумішевих бензинів на основі останнього застосовуються спеціальні позначення: E5, E10, E85. E – від англ. «ethanol», цифрові індекси – відсотковий (в об'ємних частках) вміст біоетанолу у паливі. В світі найбільш поширеними виступають суміші E85, E10 та E5, окрім того, у Бразилії виробляють та застосовують як моторне паливо чистий біоетанол – E100. Паливний етанол є найпопулярнішою добавкою до бензину [25].

Є три різні способи використання біоетанолу у вигляді моторного палива:

1) для синтезу етилтретбутилового ефіру (ЕТБЕ) – високооктанового компонента бензину, котрий володіє рядом переваг перед біоетанолом. Виробництво ЕТБЕ набуло широкого поширення у європейських країнах, в яких більше половини усього біоетанолу направляється на синтез ЕТБЕ;

2) як суміш із вмістом етанолу до 85% (E20, E30, E85) задля застосування в автомобілях із двигунами з універсальним споживанням палива. Чисте (100%) біоетанолове паливо як моторне застосовується лише у Бразилії. Що стосується інших країн, то в них етанол змішують із бензином в різних пропорціях. До прикладу, в паливній суміші E85 85% біоетанолу та 15% бензину;

3) як добавка до бензину від 5 до 15% (E5, E10, E15) задля застосування в звичайних бензинових двигунах. Паливо, яке містить етанол, маркується літерою E та цифрою, котра позначає відсоток вмісту спирту. На кшталт, E10 являє собою суміш, яка містить 10% біоетанолу та 90% бензину [4].

В біоетанолу існує один значний недолік: при низьких температурах двигун, який працює на 100%-ному біоетанолі, важко запускається. Така проблема вирішується за допомогою невеликої (близько 5%) добавки бензину. На кшталт, в Швеції міські автобуси Scania заправляють якраз такою сумішшю. В Сполучених Штатах Америки поширеним є моторне паливо стандарту E10 (взимку E15), в деяких штатах застосовується E85. Водночас, по-перше, E10 та E15 можливо заливати у бак будь-якої машини, яка працює на бензині, а по-друге, витрата пального практично не збільшується, так як біоетанол, на відміну від бензину, характеризується зниженою енергетичною густиною та підвищує октанове число суміші, за допомогою чого відповідна суміш згорає із більшою ефективністю [28].

Біоетанол, котрий одержують за допомогою ферментації із сільськогосподарської продукції, яка містить цукор чи крохмаль, на кшталт, із меляси, зерна, цукрового буряка, цукрового очерету, картоплі, кукурудзи, сорго й іншого, має хімічну формулу спирту  $C_2H_5OH$ . Відповідний біоетанол

відноситься до біопалива першого покоління. Технологія виробництва біоетанолу із крохмалевмісної сировини (картоплі, зерна) полягає у підготовці сировини через подрібнення і водно-термічній обробці, обцукровуванні під дією спеціальних ферментів, зброджуванні, перегонці на ректифікаційних колонах та зневодненні [11].

З-поміж всіх видів рідкого біопалива біоетанол виступає найбільш поширеним, світовий обсяг виробництва котрого складає більш ніж 70 млн. т. із тенденцією щорічного зростання не менше ніж на 5%. Біоетанол переважно застосовується у вигляді ефективного високооктанового компоненту різних моторних палив. До прикладу, в наш час у Сполучених Штатах Америки близько 30% всього бензину виробляють із додаванням біоетанолу. Не дивлячись на те, що за енергетичною щільністю біоетанол суттєво поступається бензину (теплота згоряння біоетанолу 19,6 МДж/л, а бензину – 32 МДж/л), заміна бензину біоетанолом спричиняє пропорційне зменшення викиду парникового газу ( $\text{CO}_2$ ) в атмосферу. Окрім того, навіть невеликий вміст біоетанолу у бензині забезпечує істотне зменшення токсичності вихлопних газів, так як наявний в біоетанолі кисень забезпечує повне згоряння суміші (в процесі спалювання біоетанолу утворюються тільки два продукти: вуглекислий газ та вода, в той час як у вихлопі бензину присутніми є сірчаний газ й інші домішки) [4].

Біоетанол із целюлози (соломи, деревини тощо) вважається біоетанолом другого покоління, для виробництва котрого не є потрібною харчова сировина. Для нашої країни із її дуже великими запасами деревини і багаторічним науково-технологічним, промисловим досвідом та можливостями, які дозволяють отримувати біоетанол завдяки освоєним технологіям гідролізу, питання його виробництва є дуже актуальним. В Сполучених Штатах Америки, не дивлячись на розвинене промислове виробництво біоетанолу методом ферментації із зерна, картоплі і кукурудзи, поступово почали освоювати й новітні гідролізні технології [8].



Біопаливо третього покоління одержують із водоростей. Виробництво вимагає великої кількості добрив й енергії. Дане пальне швидше розкладається, аніж інші види біопалива, має підвищену в'язкість при низьких температурах [1].

Біоетанол у вигляді палива володіє як очевидними перевагами, так й рядом недоліків. До безперечних переваг біоетанолу відносяться:

- низька токсичність;
- майже цілковита відсутність викиду CO у продуктах згорання;
- зниження парникового ефекту;
- біорозкладність;
- зниження залежності від нафти;
- можливість підвищення ефективності використання ресурсів сільського господарства[24].

До ключових недоліків даного виду біопалива відноситься:

- гігроскопічність;
- застосування харчової сировини;
- висока вартість (вища за ціни на нафту);
- низька ефективність мікробів-ферментувальників;
- нестабільні врожаї деяких джерел біомаси;
- підвищена витрата;
- низька теплота згорання етанольного палива (у порівнянні із нафтовим) [24].

Необхідно відзначити, що у багатьох наукових центрах здійснюються активні дослідницькі роботи із усунення вище перелічених проблем застосування етилового спирту як палива, й можливо покладати надію на те, що у найближчий час багато із них буде усунуто.

## **1.2. Сировина, яка використовується для виробництва біоетанолу**

Біоетанол можливо виробляти як із рослинної сировини (ячменю, кукурудзи, сорго, пшениці, цукрової тростини і цукрових буряків), так й із

вуглеводних відходів сільськогосподарських культур (качани кукурудзи, сухі стебла соняшнику чи різні види соломи) [4, с. 105] (рис. 1.3).

Задля виробництва біоетанолу застосовують цукровмісну і крохмалевмісну сировину. Крохмалевмісна сировина містить зернові культури (тритікале (крохмаль 67%); пшениця (крохмаль 58%); сорго (багаса) (крохмаль 60%); кукурудза (крохмаль 65%); цукрові буряки (меляса)), а цукровмісна – відтік виробництва цукру – тростинне сокоутворення, багаса, меляса й інші. Відповідно до думки С. П. Циганкова, до однієї із найбільш перспективних для нашої країни біоенергетичних культур для виробництва біоетанолу відноситься сорго цукрове (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench) [22].

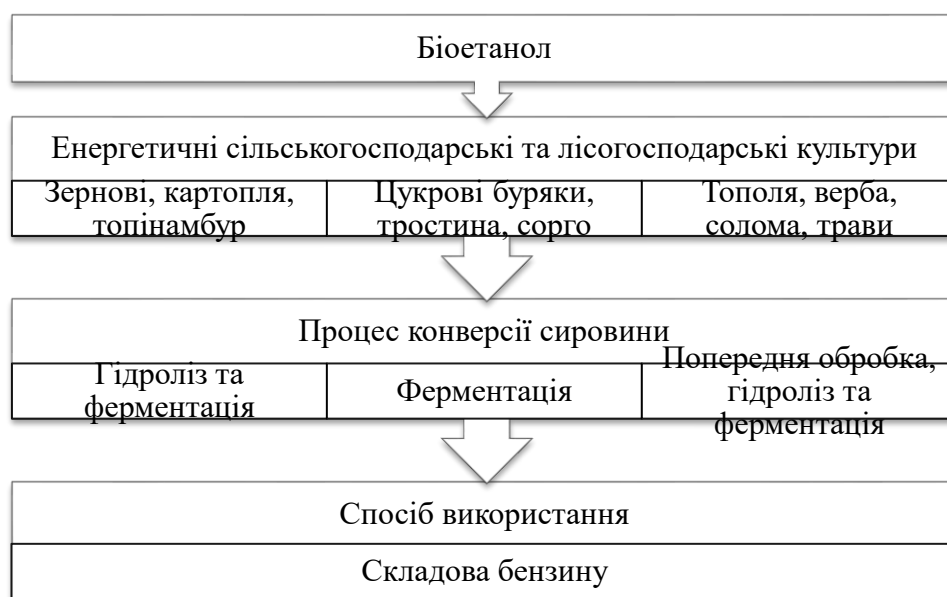


Рис. 1.3. Джерела отримання біоетанолу та способи утворення : [9, с. 172]

У той же час, відзначимо, що відповідно до інших досліджень в умовах України найефективнішою сировиною для виробництва біоетанолу виступає кукурудза [19].

Найбільш поширеними світовими сировинними джерелами виробництва біоетанолу виступають: зерно (90% зерна припадає на

кукурудзу), цукрова тростина; цукровий буряк; меляса. Кукурудза належить до переліку 5 енергетичних рослин у вигляді сировини для біопалива майбутнього завдяки 3 чинникам:

1) врожайність кукурудзи – 10 т/га зерна та 10 т/га стебел – вища, аніж соняшника і сої (3 т/га), що дає змогу одержати 3,1 т/га протеїнових кормів і додатковий бонус у вигляді біоетанолу 3,5 т/га, іншими словами таку ж кількість кормів, як і з основних культур;

2) кукурудза виступає економічно вигідним поновлюваним джерелом енергії якраз для промислового виробництва завдяки наявності та доступності для переробки протягом всього року;

3) застосування як зерна кукурудзи, так й стебла задля виробництва енергії пару, сушильного агента та електроенергії для переробки зерна у біоетанол [20].

Представимо потенціал виходу біоетанолу із різних видів сировини у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Потенціал біоетанолу із різних видів сировини

Сировина	Біоетанол, л/т (кг/т)	Суха барда, кг/т	CO <sub>2</sub> , кг/т	Всього, кг
Ячмінь	330 (265)	470	265	1 000
Жито	357 (285)	365	350	1 000
Пшениця	375 (300)	330	370	1 000
Тритикале	385 (310)	310	380	1 000
Кукурудза	430 (345)	310	345	1 000

Джерело: [20]

Отже, можемо бачити, що кукурудза володіє найвищими показниками виходу продуктів – біоетанолу, DDGS, CO<sub>2</sub> – із 1 тонни сировини.

Подивимось на технологію виробництва біоетанолу. Першим кроком до отримання етанолу із рослинної біомаси виступає подрібнення і попереднє оброблення. Найбільш перспективними технологіями виступають ферментні процеси (рис. 1.4) [27].

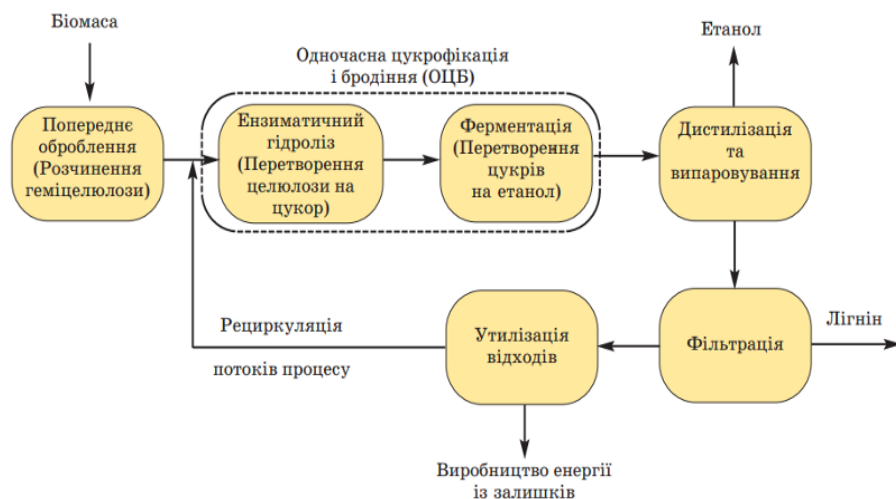


Рис. 1.4. Узагальнена технологія виробництва біоетанолу : [15, с. 21; 27]

Целюлозні полімери та геміцелюлоза гідролізуються кислотами чи ензимами для вивільнення мономерних цукрів. Після попереднього оброблення і ферментного гідролізу цукри ферментуються дріжджами, бактеріями чи іншими грибами, проте ферментний гідроліз та ферментація можуть бути проведені комбіновано, в ході так званої одночасної цукрофікації та бродіння. Після остаточного очищення за допомогою дистиляції етанол можливо застосовувати у вигляді палива в чистому вигляді чи у суміші із бензином [15, с. 20].

Головними джерелами виробництва біоетанолу в нашій країні виступають меляса та кукурудза, таким чином зосередимось на технології виробництва біопалива із даної сировини. Технологія виробництва біоетанолу із зерна на відміну від технологічного способу на мелясі диференціюється більш ускладненими процесами, додаванням додаткових стадій по переробці зерна та вторинних виробничих продуктів, що зрештою дає змогу одержати різноманітний спектр додаткових продуктів. Процес виробництва біоетанолу із зерна поділяється на такі головні стадії:

1) очищення та помел зерна; 2) пілінг зерна; 3) виготовлення замісу; 4) розрідження суслу; 5) дріжджогенерація; 6) спиртове бродіння; 7) дистиляція-ректифікація; 8) дегідратація-денатурація; 9) декантація; 10) концентрація; 11) сепарація й сушіння оливи; 12) сушіння; 13) очистка і зрідження CO<sub>2</sub>.

Основні етапи процесу виробництва біоетанолу із зерна схематично представлено у Додатку А.

Процесну схему виробництва біоетанола із зерна представлено у Додатку Б.

Меляса виступає конкурентоспроможною сировиною для виробництва біопалива в Україні з-поміж інших різноманітних видів біосировини, оскільки має найліпше співвідношення доступності і ціни. Меляса чи чорна патока представляє побічний продукт переробки цукрових буряків в процесі виробництва цукру. Основні стадії процесу виробництва біоетанолу із меляси представлені у Додатку В. Процесна схема виробництва біоетанолу із меляси наведена у Додатку Г.

Із мелясної барди утворюється сировина для виробництва біогазу і біодобрих, КМБ, із рентабельністю у 20%. Із зернової барди – дорога сировина для виробництва високопротеїнових кормів із рентабельністю у 150% (рис. 1.5).

Окрім одержання біоетанолу вказаними способами науковцями розглядаються методи його виробництва із деревини, у котрій сумарний вміст полісахаридів можливо порівняти із вмістом останніх у зерновій сировині. Нові розроблені ферменти дозволяють доволі швидко й із високим виходом глюкози оцукровувати целюлозу, проте складністю даного процесу залишається необхідність пошуку інших прийомів підготовки сировини. Справа у тому, що у деревині знаходяться лігнінні речовини, котрі

здійснюють інгібуючий вплив на ферменти, спроможні оцукровувати целюлозу [27].

До іншої можливої сировини для виробництва біопалива, в тому числі і біоетанолу, відносяться водорості. Перевагою водоростей є велика врожайність і цілорічне зростання без участі людини. Головним компонентом морських водоростей виступають поліальгінові кислоти, вміст котрих складає приблизно 60% [28].

Уже протягом кількох десятиліть світовий ринок біоетанолу успішно розвивається, та загальні обсяги виробництва вимірюються мільярдами літрів. Відповідно до оцінок Міжнародного енергетичного агентства, в 2022 році було вироблено понад 114 млрд. л. Лідерами даного напрямку виступають Сполучені Штати Америки (50% світового обсягу виробництва, здебільшого із зерна кукурудзи) та Бразилія (31%, сировина – цукрова тростина) [8] (рис. 1.6).

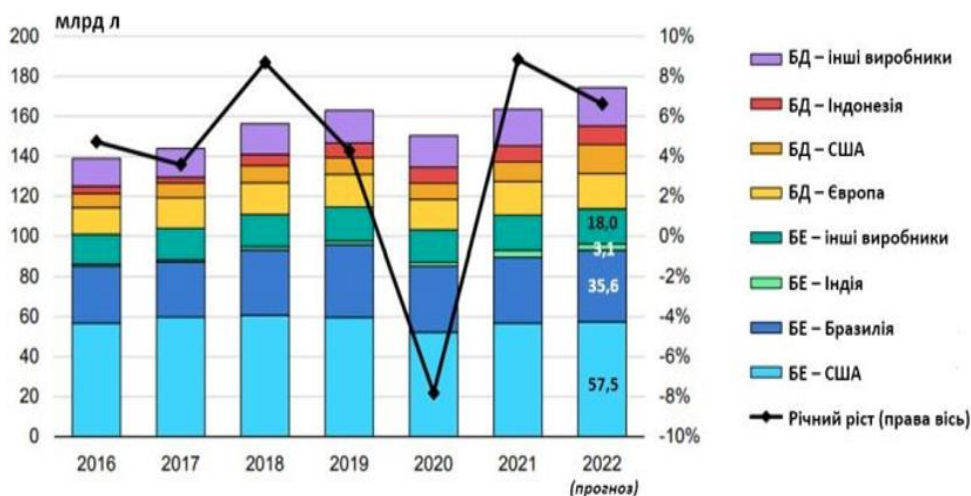


Рис. 1.6. Динаміка виробництва біоетанолу у світі, млрд. л

Джерело: [23]

Більше ніж 90% біоетанолу, який виробляється в світі є біопаливо першого покоління (традиційне) й, відповідно до прогнозів, дана структура буде зберігатися, щонайменше, до 2030 року.

В Європі виробляється більше 5 млрд. л біоетанолу на рік, хоча встановлені потужності дають змогу одержувати близько 10 млрд. (рис. 1.7).

До провідних виробників відноситься Франція (лідер), Угорщина, Німеччина. У Європейському Союзі 55 заводів виробляють біоетанол першого покоління та 4 заводи – біоетанол другого покоління (передовий) із лігноцелюлозної сировини. В 2022-му дані заводи були завантажені на 83% і 52%, відповідно. Заводи із виробництва біоетанолу першого покоління мають продуктивність до 400 млн. л. на рік, передового біоетанолу – до 70 млн. л. [8].

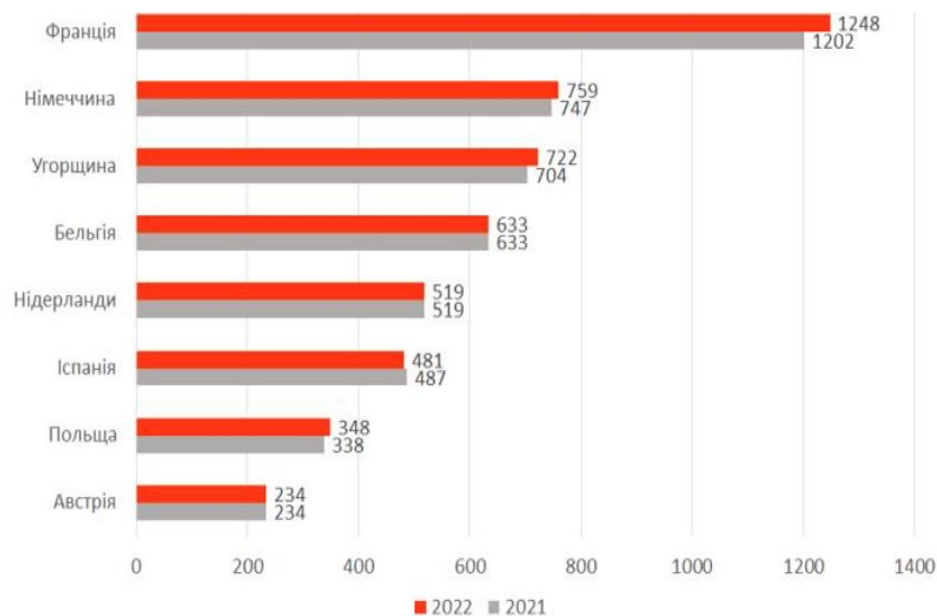


Рис. 1.7. Основні виробники біоетанолу в Європі, млрд. л на рік [25]

Провідним видом сировини для виробництва біоетанолу у Європі виступає зерно кукурудзи – із нього одержується понад 50% загального обсягу біопалива (рис. 1.8). Частка передового біоетанолу (із лігноцелюлозної і подібних видів сировини) складає тільки близько 8%. В наш час максимально можливою часткою змішування біоетанолу із бензином, для котрої не потрібна модифікація транспортного засобу є до 10% (бензин E10). Більшість автомобілів, вироблених після 2000-го, сумісні із E10, а нові – навіть оптимізовані для роботи на ньому [4]. В Європі більша частка бензину на ринку все ще відповідає паливу E5 (до 5% біоетанолу), в той час як E10 (до 10% біоетанолу) являє собою динамічно зростаючий сегмент ринку. На сьогоднішній день E10 доступний в 15 країнах Євросоюзу й у Великій Британії. Паралельно із цим в 12 країнах Європейського Союзу

бензин E10 вже займає від 45% (Естонія) до 100% (Румунія, Болгарія) ринку [1].

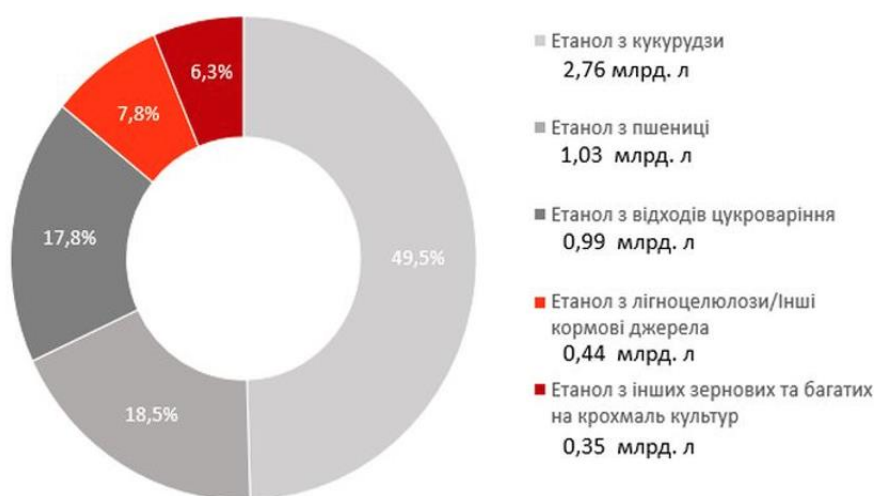


Рис. 1.8. Структура сировини для виробництва біоетанолу в Європі [26]

Бензини E5 та E10 вважаються паливом із низьким вмістом біоетанолу, в той час як існує суміш E85 із вмістом біоетанолу 50–85%. Бензин E85 може використовуватися в транспортних засобах із гнучкими вибором палива (FFV). Такі автомобілі можуть працювати не лише на E85, проте й на традиційному бензині чи суміші бензину із біоетанолом у межах 85% без потреби в окремих баках. Це є можливим завдяки тому, що впорскування палива і час запалювання регулюються автоматично відповідно до фактичної суміші, окресленої датчиком складу палива [17].

У нашій країні існують суттєві перспективи розвитку виробництва біоетанолу і ринку застосування останнього.

В Україні річне споживання моторних палив в 2021 році складало:

- дизельного палива – 5,7 млн. т.;
- бензину – 2,0 млн. т.;
- пропану та бутану скраплених – 1,3 млн. т.

Загальна частка енергії, виробленої із відновлюваних джерел у нашій країні, у валовому кінцевому енергоспоживанні в 2020-му складала 9,2%, в тому числі:

- у транспортному секторі – 2,5%;



- у системах опалення – 9,3%;
- в електроенергетиці – 13,9% [7].

В 2020 році валовий кінцевий обсяг споживання енергії із відновлюваних джерел в транспортному секторі складав 95 тис. т. нафтового еквіваленту (н. е.), зокрема біоетанолу – 51,1 тис. т. н. е. Середній вік легкових автомобілів у нашій країні складав 22,7 років (є найстарішим автопарком у Європі). Однак, не дивлячись на «старість» українського автопарку, більшість легкових автомобілів, які експлуатуються в Україні, є сумісними для роботи із бензиновими сумішами Е5 і Е10 [1].

Проєктом Національного плану дій із розвитку відновлюваної енергетики до 2030 року визначено індикативну ціль споживання енергії із відновлюваних джерел в 2030 році на рівні 27%, зокрема в секторах:

- транспорту – 14%;
- опалення й охолодження – 35%;
- електроенергетики – 25%. Вказана ціль по транспорту відповідає застосуванню 651 тис. т. н. е. без врахування мультиплікаційних коефіцієнтів, із котрих 325 тис. т. н. е. – споживання рідкого біопалива (біоетанолу, біодизелю), 6 тис. т. н. е. – споживання біометану [17].

### **1.3. Основні підприємства України, що виробляють біоетанол**

У нашій країні існують 22 невеликих біоетанолових заводи, котрі в цілому можуть виробляти понад 500 млн. л/рік. Із них сім представляють нові приватні виробництва, інші є реконструйованими старими державними заводами. На сьогоднішній день на повну потужність стабільно функціонують менше половини зі всіх господарюючих суб'єктів [14].

Ключовою з-поміж них виступає Українська технологічна компанія UTC – інтегрована інжинірингово-виробнича компанія, яка впроваджує біотехнології на суб'єктах господарювання мікробіологічної, переробної і харчової промисловості.

Блокада вітчизняних портів та проблеми із експортом аграрної продукції змінили ситуацію в напрямок міркувань та дій стосовно переробки даної продукції всередині країни. До одного із можливих напрямків відноситься виробництво біоетанолу із зерна. Так, на кшталт, в грудні 2022 року компанія «Газтранзит» підписала угоду на розробку проєкту із будівництва заводу із переробки пшениці на паливний етанол. В першому кварталі 2023-го теж планується початок проєктування ще трьох заводів із глибокої переробки агросировини із одержанням біопалива у різних регіонах нашої країни. Наша держава володіє суттєвим потенціалом біомаси, який доступний для виробництва газоподібних і рідких моторних біопалив. Відповідно до оцінок 2021 року, даний потенціал для виробництва біоетанолу складає 0,86 млн. т. н. е. на рік, а до 2050-го може зрости до 1,29 млн. т. н. е [8].

Проблема виробництва та застосування біопалив виступає багатогранною, відповідно шляхи вирішення останніх лежать в кількох площинах:

- 1) пошук та опрацювання ефективних технологій одержання енергії, забезпечення економічного і нормативного супроводу застосування біопалив;
- 2) розроблення сучасних технологій перетворення сировини на потрібні види біопалив, до того ж застосування побічних продуктів;
- 3) пошук і створення найбільш ефективних джерел біопалив (здебільшого рослинних ресурсів) [5, с. 66].

В наш час економічно вигідним виступає виробництво біоетанолу із зерна кукурудзи. З метою досягнення рентабельного виробництва передового біоетанолу потрібно знаходити шляхи здешевлення операційних і капітальних витрат такого виробництва.

Розвиток цього напрямку передбачає подолання, щонайменше, головних бар'єрів, які існують в секторі моторних біопалив України.

Провідними рекомендаціями що стосуються біоетанолу виступають наступні:

1) ввести пільгове оподаткування на ввезення до нашої країни авто із гнучким вибором палива, котрі можуть застосовувати до 85% біоетанолу у якості палива;

2) знизити вимоги стосовно податкового векселя на повну ставку акцизу, потрібного при транспортуванні біоетанолу;

3) на законодавчому рівні потрібно встановити обов'язкову частку біоетанолу в бензині (обов'язкова частка 10% для існуючих двигунів, а на перспективу – до 50–85% для авто із гнучким вибором палива) [8].

Більш ніж 80 країн наразі мають політику підтримки рідкого біопалива. Ряд країн, у тому числі Сполучені Штати Америки, Канада, Литва і Китай, із 2021 року проголосили, що інвестують суттєві кошти у дослідження і впровадження біопалива. До того ж, в серпні 2022 року США прийняли Закон про зниження інфляції, котрим передбачається розширена і нова політика підтримки біопалива, в тому числі сучасного біопалива й екологічно чистого авіаційного палива. В 2021 році Індією було оновлено власну політику спільного спалювання біомаси, сконцентрувавшись на утилізації сільськогосподарських відходів й задля зниження забруднення повітря у сільській місцевості. Із 2021 року Великобританія, Швеція і Бразилія запровадили політику подальшого розвитку біопалива у власних економіках [23].

Потреба в здійсненні досліджень в галузі виробництва біоетанолу зумовлена тим, що застосування біоетанолу як моторного палива являє собою один із перспективних шляхів декарбонізації сектору транспорту, водночас ефективність цього виступає істотно вищою при споживанні сумішевих бензинів із високою часткою даного біопалива (E85). До того ж, виробництво біоетанолу має цілу низку макроекономічних переваг, зокрема таких, які представлено на рис. 1.9.

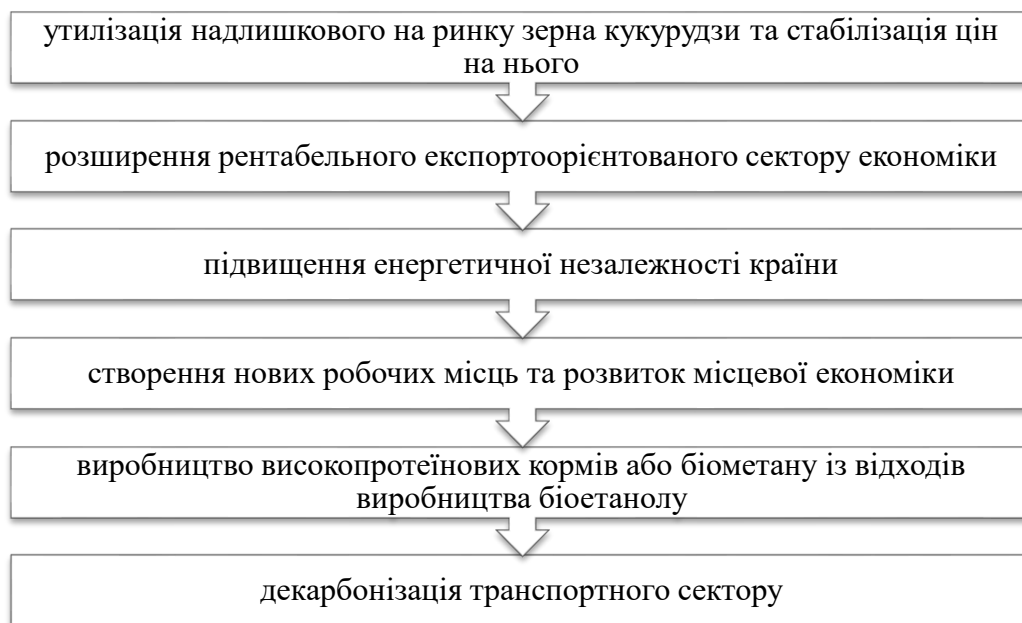


Рис. 1.9. Ключові переваги виробництва біоетанолу

Джерело: [8]

Отже, можемо підсумувати, що за нинішнього етапу застосування біоетанолу у вигляді альтернативного джерела енергії виступає досить актуальним питанням у контексті зниження забруднення навколишнього середовища та поступового вичерпання запасів непоновлюваних джерел енергії, таких як природний газ і нафта. В наш час технології виробництва біоетанолу як в світі, так і у нашій країні активно розвиваються, обсяги споживання даного виду біопалива збільшуються. Аналіз біологічних ресурсів для виробництва біопалив в нашій країні вказує на те, що використання альтернативних джерел має великі потенційні можливості для суттєвого покращення енергозабезпечення держави.

Особливо перспективними для виробництва біопалив виступають побічні продукти аграрного лісового і виробництва господарства. Паралельно із цим, вагоме місце посідає культивування цільових енергетичних рослин різного напрямку використання. В наш час в Україні створено одну із найбільш багатих колекцій енергетичних рослин і їх високопродуктивних сортів. За енергетичним потенціалом дані рослини

можуть успішно конкурувати із найліпшими світовими аналогами та забезпечувати високий вихід умовного палива й енергії.

В незалежності від цілей, для котрих призначене виробництво етанолу, зазначений високоякісний продукт біотехнології має велике майбутнє у практичній діяльності людства й таким чином інтенсифікація його виробництва має великі перспективи. Цим пояснюється все більша кількість наукових досліджень із розроблення нових видів сировини для біоконверсії в етанол та способів її переобробки, до того ж пошуку і селекції нових рас спиртових дріжджів, котрі найбільш повно відповідають поставленим цілям.

## РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1. Апаратурне забезпечення технологічного процесу переробки меляси в біоетанол

В нашій країні для виробництва етилового спирту (біоетанолу), в основному, використовують фуражне зерно, кукурудзу, цукрові буряки та мелясу (рис.2.1). Однак, на нашу думку, перспективною сировиною є меляса – побічний продукт технологічного процесу виробництва цукру.

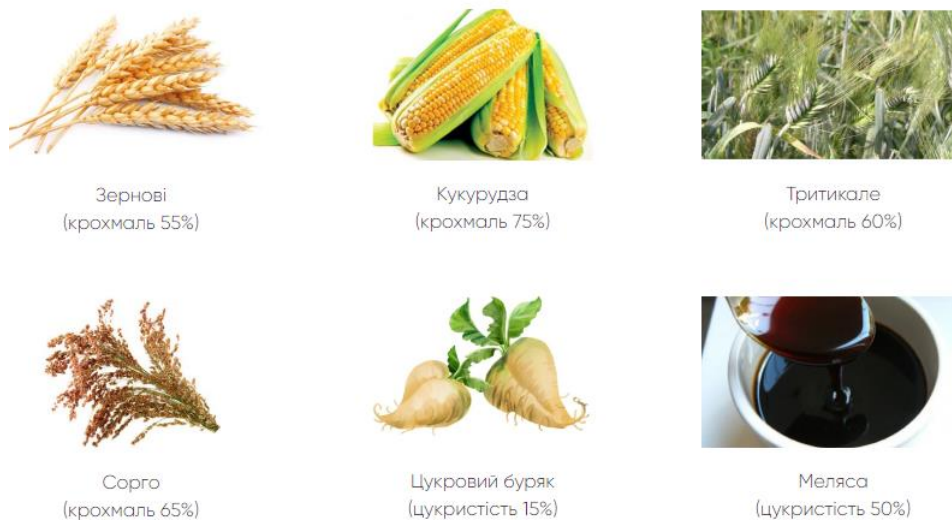


Рис. 2.1. Найбільш популярна сировина в Україні для  
виробництва біоетанолу

Технологічний процес виробництва біоетанолу на мелясному середовищі відноситься до безвідходної технології, яка забезпечує підвищення рентабельності та практично не забруднює довкілля (рис.2.2). Меляса із фізико-хімічної точки зору – колоїдна рідина темно-коричневого забарвлення із густиною 1,35..1,40, де розчинені органічні та мінеральні речовини. У мелясі може міститися до 12 і більше відсотків цукрів (дицукридів та моноцукридів), які були нагромадженні у цукрових буряках. У процесі переробки цукрового буряка в мелясу відходить від 3,5 до 5 % цукрів у перерахунку на суху речовину.

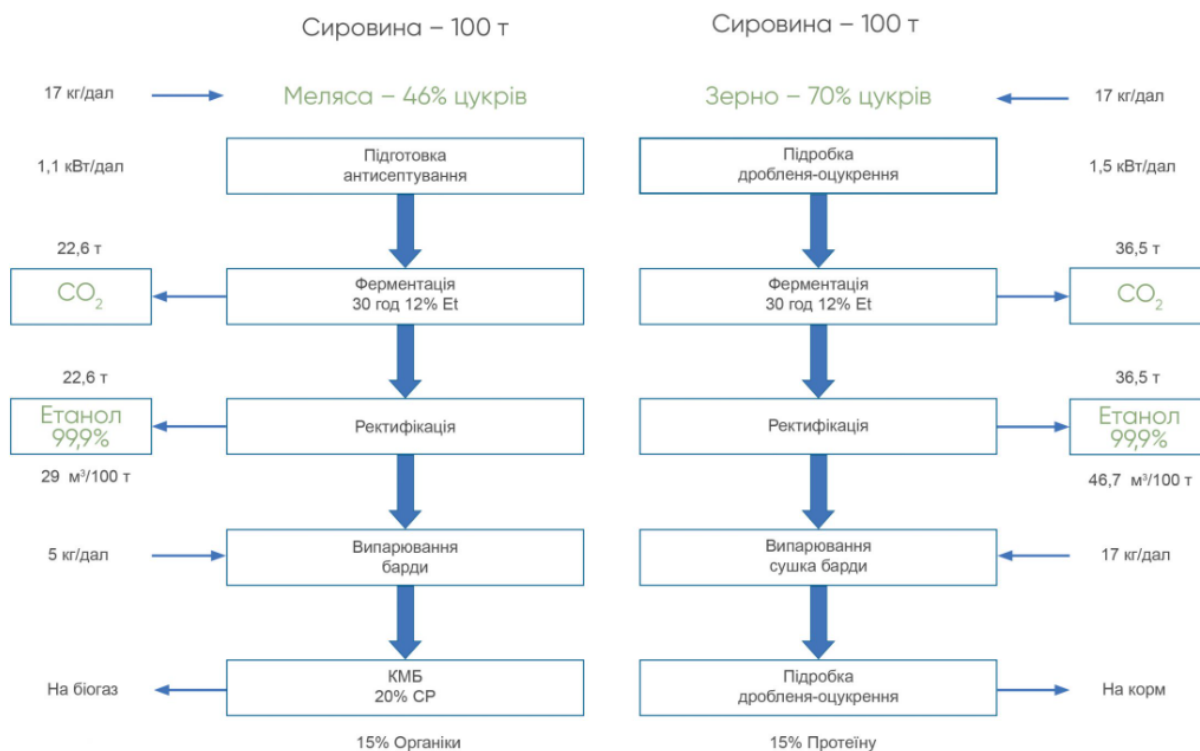


Рис.2.2. Характеристика технологій переробки м'яса і злакових на біоетанол

Серед різних видів сировини м'яса є найбільш вигідною для виробництва етилового спирту. У ній високий вміст зброджуваних цукрів, а також речовин, які потрібні для нормальної життєдіяльності дріжджів. При переробці м'яса спрощується технологічна схема, тому що виключаються операції розварювання сировини і оцукрювання крохмалю ферментами солоду або ферментних препаратів. У м'яясному суслі відсутні декстрини і неоцукрений крохмаль, тому воно швидше зброджується, при цьому зменшуються втрати зброджуваних вуглеводів і збільшується вихід спирту у перерахунку на умовний крохмаль, знижується собівартість спирту і зростає продуктивність праці. При комплексній переробці м'яса можна одержувати великий асортимент цінних для народного господарства продуктів.

Технологічний процес одержання біоетанолу починається із доправлення м'яса на завод у залізничних цистернах, м'ясу із цистерн зливають у приймальні збірники, а потім проводять змішування м'яса з кислотами та мінеральними речовинами, яке проходить у змішувачі (розсиропнику) (рис. 2.3). За будовою він нагадує циліндричний

горизонтальний корпус, де обертається вал із швидкістю 70...80 об/хв та часом перебування м'яси до 10 с.

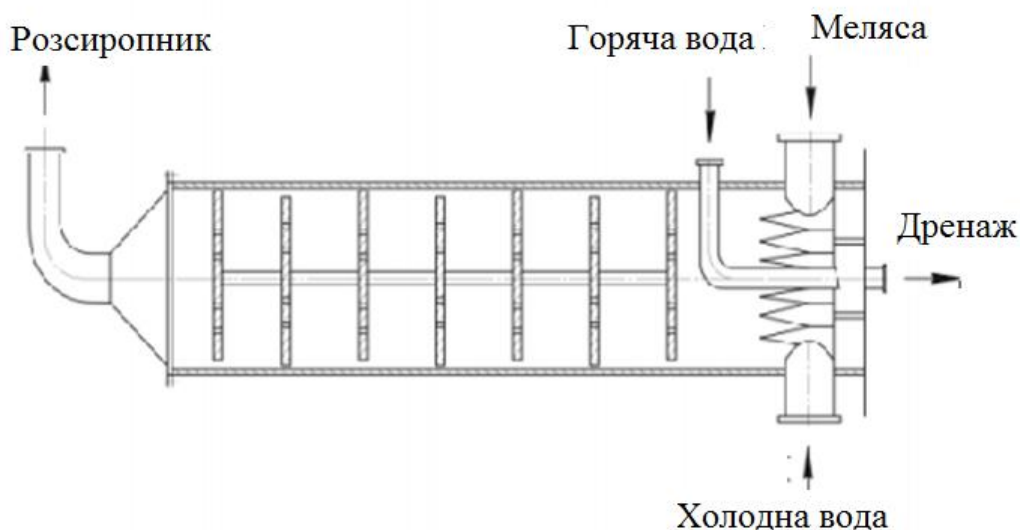


Рис.2.3. Змішувач

Підкислюють м'ясу сульфатною (140 кг) та хлоридною (198 кг) кислотами на 1000 Дал спирту. Крім того, до м'яси додають асептичні засоби з високою бактерицидною дією (табл.2.1).

Таблиця 2.1.

#### Регламентні норми антибіотичних препаратів

Препарати	кг на 1000 Дал спирту
Хлорне вапно	11,0
40%-ний формалін	5,0
Сульфонол	2,13

Затор витримують не менше 8 годин, а потім передають його на механічний вловлювач (рис. 2.4). Він представлений посудиною циліндричного типу з сітчастою перегородкою (вставкою), з отворами діаметром 5...10 мм. Сітчасту перегородку час від часу виймають і вручну очищають. Уловлювачі ставлять перед насосами, сітчасті перегородки уловлюють крупні домішки, що потрапили в заміс з водою чи м'ясою.



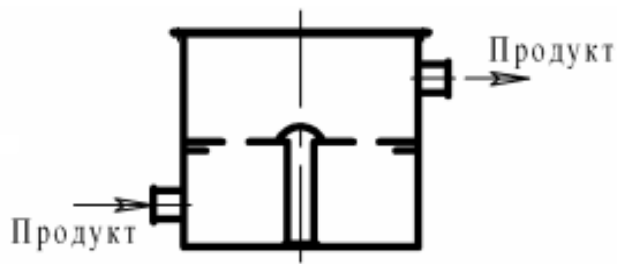


Рис.2.4. Конструкція уловлювача

Потім за допомогою помпи, затор подається у напірний збірник, а далі до 25% подається в бродильне відділення та дріжджегенераторне відділення – решта (рис.2.5).

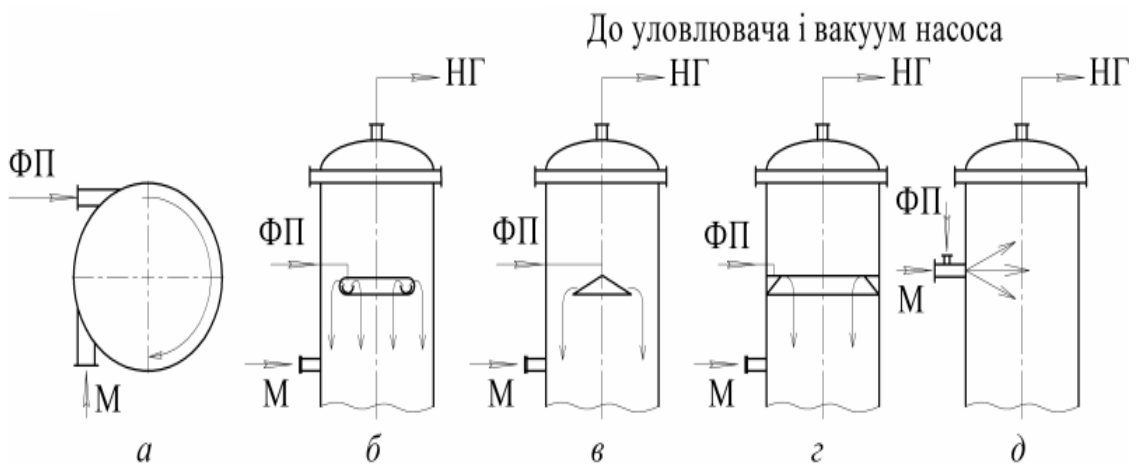


Рис. 2.5. Уведення ферментних препаратів:

ФП – ферментні препарати; НГ – неконденсовані гази; М – розварена меляса

Чисту культуру дріжджів отримують в центральній лабораторії, а потім розводять в АЧК. З АЧК дріжджі перепускають з тисненням повітрям в дріжджегенератори. Перший дріжджегенератор заповнюється 8 годин. Вони з'єднані комунікаціями і заповнюються по чергово.¶

Закачавши перший дріждігенератор, сюди подається розсиропка із розсиропнику. У розсиропнику меляса доводиться до концентрації 17% сухих речовин,  $t=24-26^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{pH}=4.95-5.1$  і поступає безперервно на всі 5 дріжджегенераторів.¶

У теплообміннику охолоджують заміс до технологічної температури бродіння (рис.3.6).

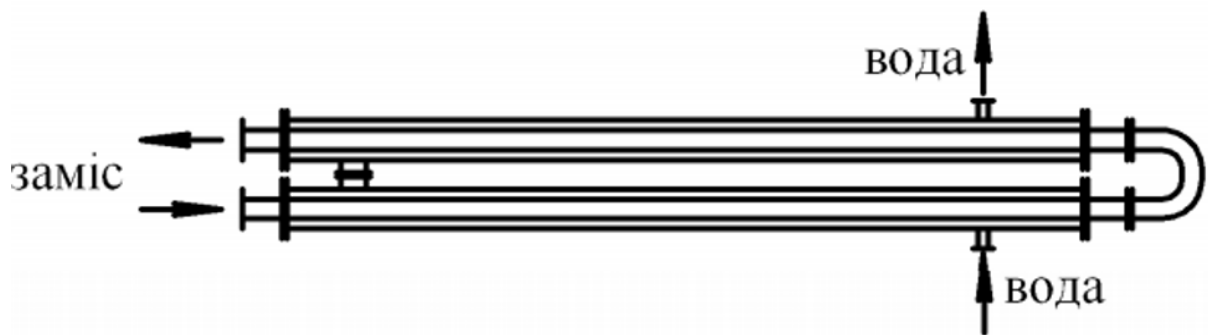


Рис.2.6. Теплообмінник для охолодження оцукреної маси типу «труба в трубі»

При зброджуванні цукрів меляси, виділяється багато тепла, яке відводиться завдяки охолоджуваній воді, що подається на змієвик. При встановленій роботі дріжджі через спеціальні воронки, що встановлені у дріжджегенераторах, подаються у бродильне відділення. Зрілі дріжджі з дріжджегенераторів по комунікаціям самопливом потрапляють в перший головний бродильний апарат (рис.2.7).

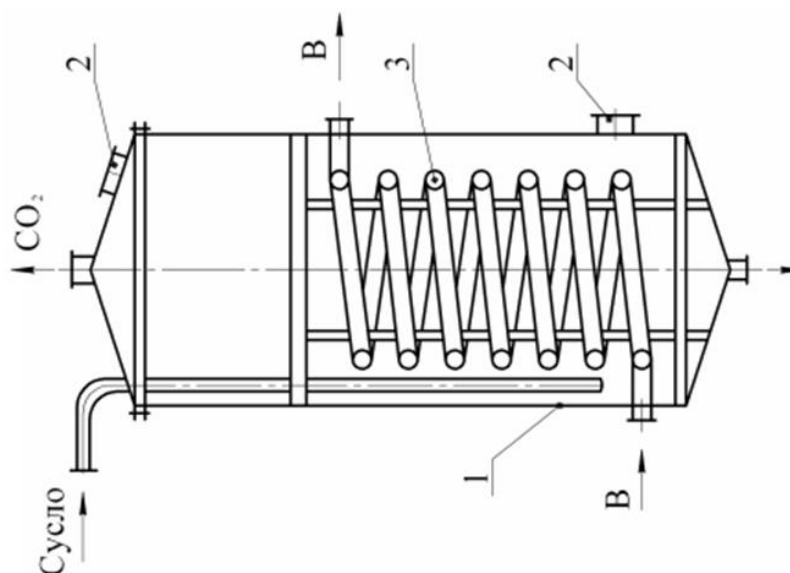


Рис.2.7. Бродильний апарат: 1 – стінка апарату; 2 – люк; 3 – змієвик.

Технологічні газуваті речовини: вуглекислий газ та етиловий спирт у спиртовловлювачі (рис.2.8).

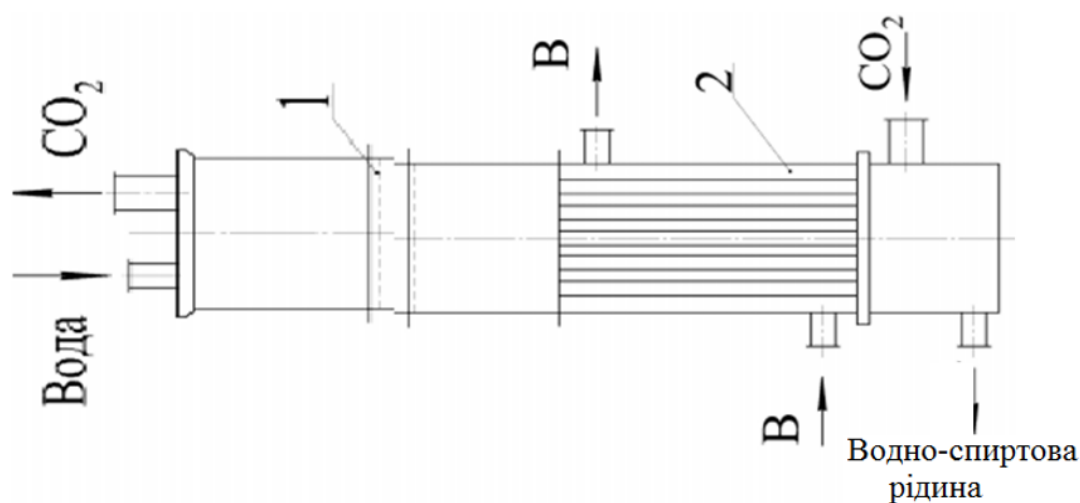


Рис.2.8. Спиртовловлювач: 1 – простір для крапельного контакту; 2 – трубчатий теплообмінник

Технологічна карта та апаратурне забезпечення зброджування меляси одно потоковим способом наведена на в табл.2.2 та на рис. 2.9.

Таблиця 2.2

Технологічна карта зброджування меляси одно потоковим способом

Показники	Одиниці виміру
Концентрація мелясної розсіропки, що надходить в дріжджегенератори	17,0%
Кислотність розсіропки	0,3-04 <sup>0</sup> Д
Температура в дріжджегенераторах	28-30 <sup>0</sup> С
Кислотність в дріжджегенераторах	0,3-0,5 <sup>0</sup> Д
рН в дріжджегенераторах	5,0-5,2
Біомаса дріжджів	20,0-25,0 г/л
Температура бродіння	28-30 <sup>0</sup> С
Кислотність в бродильних апаратах	0,5 <sup>0</sup> Д
Вміст алкоголю в зрілій бражці	6,0-8,5% об.
Біомаса дріжджів в дозрілій бражці	28-32 г/л.

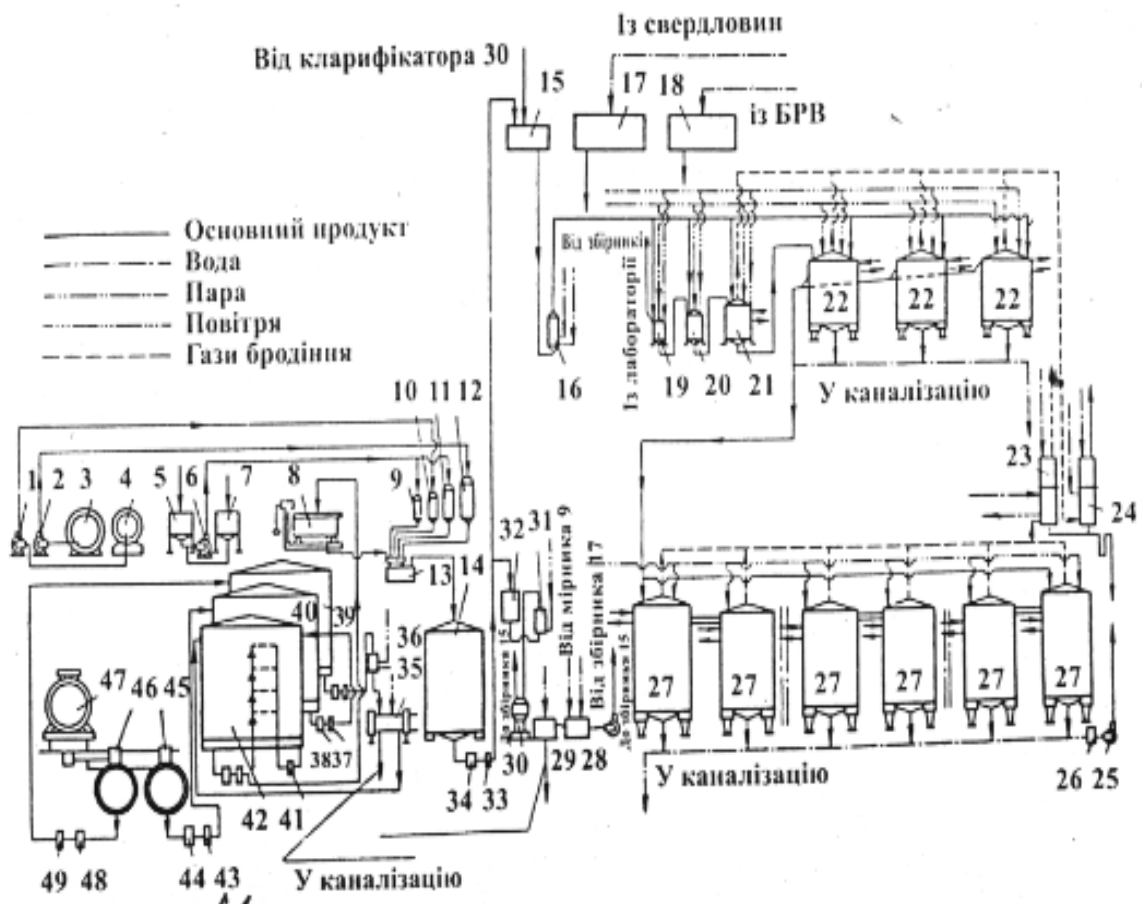


Рис. 2.9. Апаратурно-технологічна схема збродження меляси одно потоковим способом

Для одержання ректифікованого спирту із бражки використовується брагоректифікаційна установка з колоною кінцевої очистки. Зріла бражка відцентровим насосом подається в додатковий підігрівач, в якому підігрівається на 10-12<sup>0</sup>С. потім бражка подається в бражний підігрівач, в якому підігрівається до температури 80-90<sup>0</sup>С теплом водно-спиртових парів з бражної колони.

Ректифікація – процес розділення багатокомпонентних рідких сумішей, розчинів на компоненти або групи компонентів-фракції шляхом тепло- і масообміну між рідинною і паровою фазами. З цього визначення апаратурне оформлення передбачає використання пристроїв для контакту рідинної і парової фаз, для утворення парової фази, її конденсації (рис. 2.10).

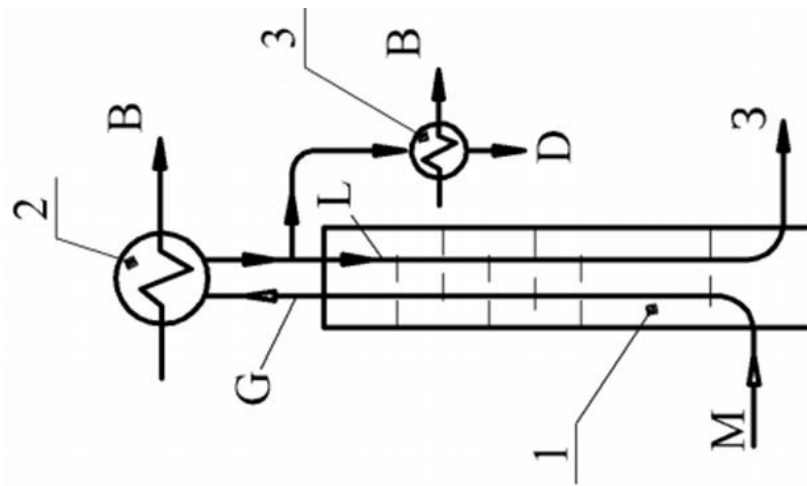


Рис.2.10. Схеми концентраційної ректифікаційної колони.

## 2.2. Матеріал і методи

Об'єктами досліджень були сушло, приготоване з крохмальвмісної сировини, продуценти етилового спирту *Saccharomyces cerevisiae*, процеси термоферментативної обробки і зброджування сусла та зріла бражка. В якості продуцентів етилового спирту використовували експериментальний штам дріжджів *S. cerevisiae* ДС-01-Е, адаптований до зброджування сусла підвищеної концентрації (ІПР НААН, Україна) та сухі дріжджі Thermosacc® Dry (Lallemand Biofuels & Distilled Spirits – Данія), які широко використовуються на підприємствах спиртової галузі.

Для проведення експериментальних досліджень проводили підготовчу роботу щодо подрібнення сировини – відходів кукурудзи для зброджування з метою одержання біоетанолу. Якісні показники відходів кукурудзи наведені в табл. 2.3.

Таблица 2.3.

Показники якості сировини крохмальвмісної, що надходила на виробництво  
(середнє значення)

Показник	Значення
Вміст крохмалю,%	58,34
Вміст домішки *,%	43,86
Вміст вологи в зерні,%	13,57

Сировину, що надходила на виробництво, очищували від мінеральних і органічних домішок розміром 2-3 см, зважували на електронних вагах, остаточне подрібнення сировини здійснювали на молоткових дробарках. Дисперсність помелу складала 96-98% проходу через сито з діаметром отворів 1,0 мм. Помел змішували з водою за температури 75°C.

Культивування дріжджів здійснювали в чотирьох дріжджегенераторах робочою ємністю 40 м<sup>3</sup> кожний. При культивуванні дріжджів сусло збагачували азотом та фосфором в кількості:

- карбамід – 14 кг;
- ортофосфорна кислота – 6 л;
- глюкоамілаза – 4 л;
- протеаза – 0,5 л – на один дріжджегенератор.

Підкислення дріжджегенераторів проводили сірчаною кислотою до титрованої кислотності 0,3 (що відповідає рН 4,7-4,9).

Якісні показники технологічного процесу характеризували за вмістом не проферментованих вуглеводів та загально прийнятих методів у спиртовій промисловості:

- вміст крохмалю – поляриметрично;
- вміст домішок – гравіметрично;
- вміст вологи та сухої речовини – висушуванням в сушильній шафі;
- вміст залишкових вуглеводів та гліцеролу – за допомогою фотоелектрокольориметра;
- вміст спирту – спиртоміром;

- кислотність – потенціометрично.

## РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1. Сучасні технології одержання біоетанолу

Сучасні технологічні рішення щодо одержання етилового спирту і біоетанолу можуть використовувати різноманітні субстрати (сировину) як харчового призначення, так й побічні відходи переробної промисловості та сільського господарства. Одержання етилового спирту харчового призначення має свої особливості (рис. 3.1) та складаються із наступних стадій:

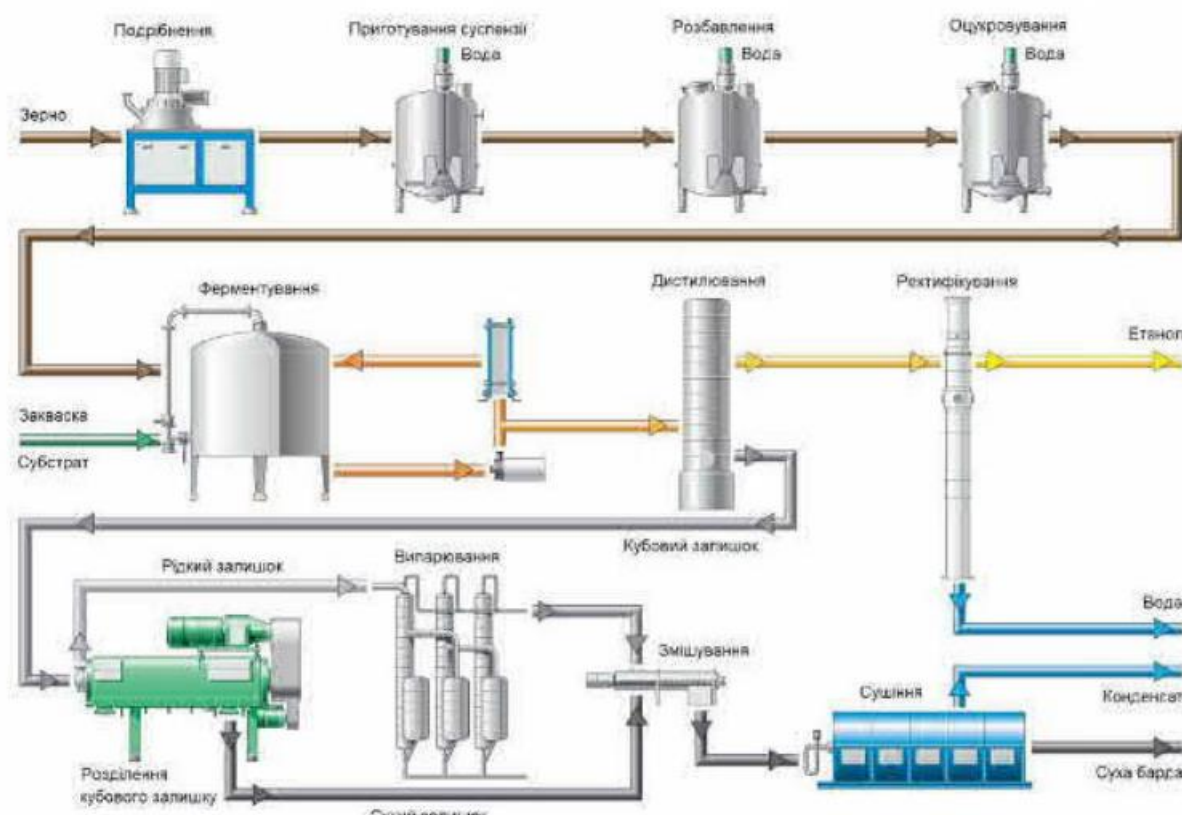


Рис. 3.1. Виробництво харчового етилового спирту за технологією «сухого» способу

- 1) технологічна підготовка (очистка та подрібнення) цукро- чи крохмальвмісної сировини: зерна злаків, кукурудзи, картоплі, топінамбура, тощо;
- 2) бродіння – розщеплення під дією гідролітичних ферментів дріжджів полі-, ди- та моноцукридів у етиловий спирт;
- 3) процес розділення та виділення цільової продукції з браги.



Технологія отримання біоетанолу на промисловій основі подібна з технологією отримання харчового етилового спирту, хоча має певні особливості, а саме технологія отримання паливного спирту здійснюється у "мокрый" спосіб (рис. 3.2).

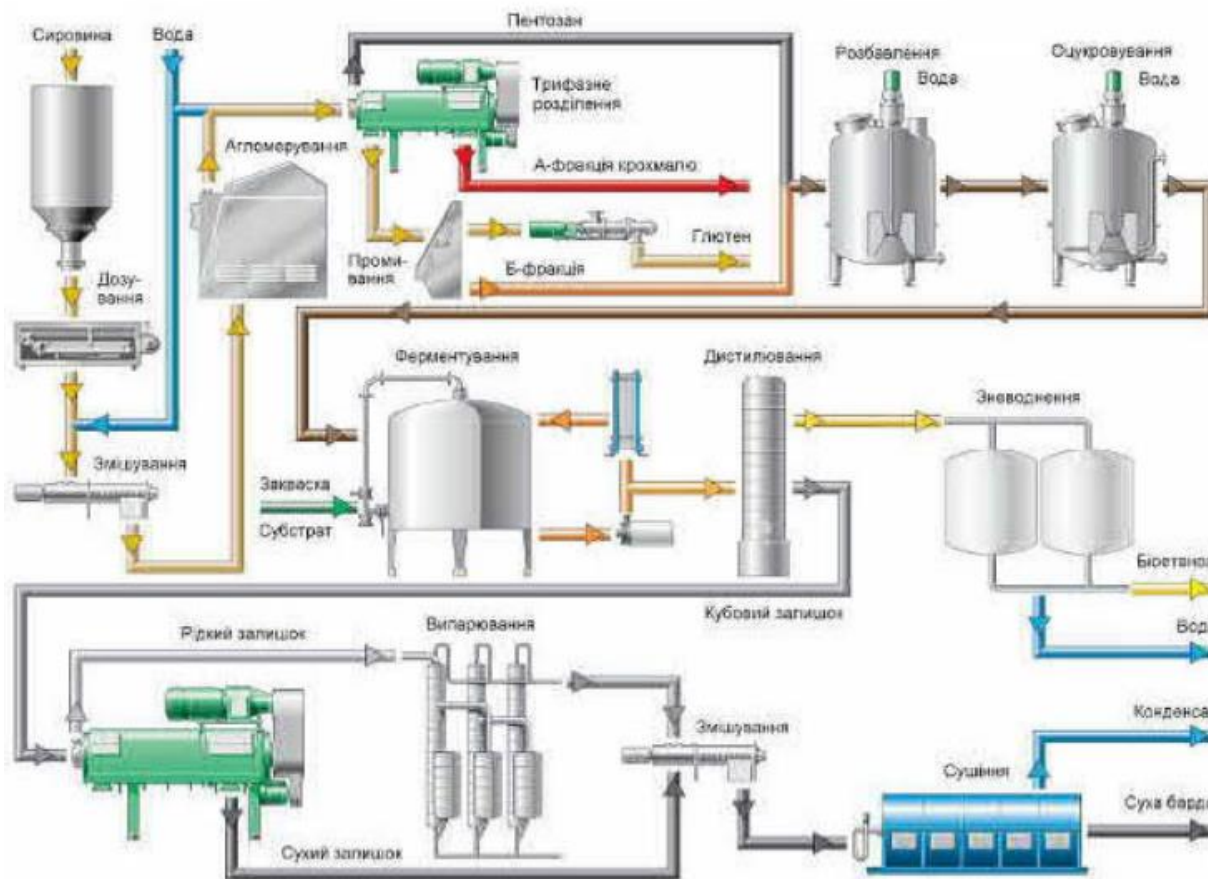


Рис. 3.2. Виробництво паливного етилового спирту (біоетанолу) за технологією “ мокрого” способу

У "мокрому" процесі спочатку виділяють глютен і крохмаль, який потім спрямовують на виробництво етанолу, у "сухому" глютен не виділяють. Для виробництва біоетанолу, зазвичай, достатньо двох ректифікаційних колон, тоді як на заводі харчового спирту таких колон п'ять.

Технологічні особливості та апаратурне забезпечення процесу виробництва біоетанолу залежить від вибраної сировини (рис. 3.3):

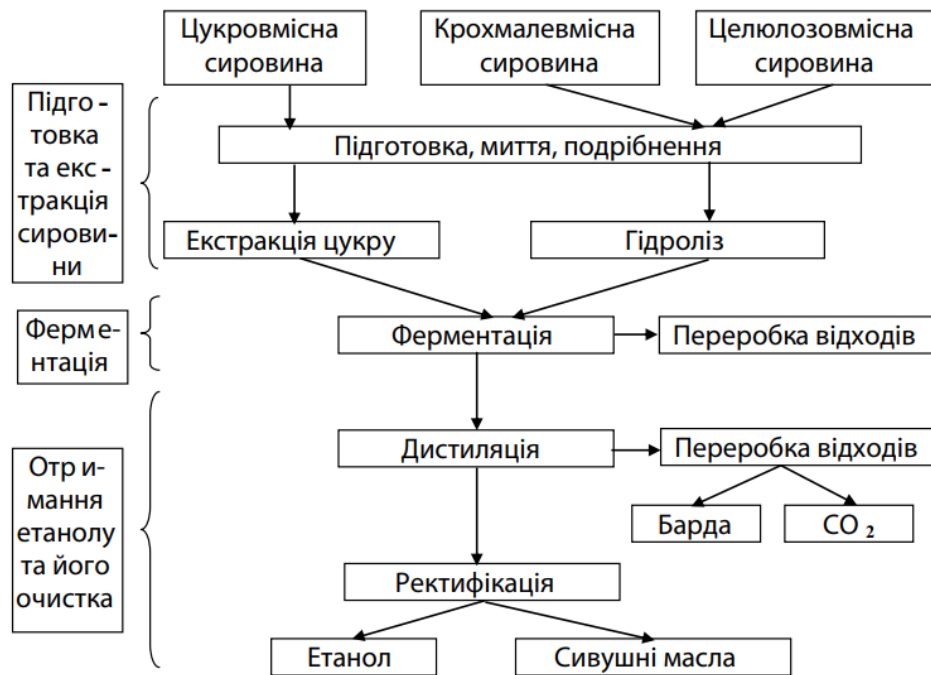


Рис. 3.3. Схема виробництва етанолу

Етиловий спирт паливного призначення можна одержувати із клітковини та інших органічних відходів АПК із значним вмістом поліцукридів (рис.3.4). Особливості даної технології зводиться до того, що одержаний продукт – етиловий спирт необхідно додатково зневоднити, бо додавання до бензину 96% етанолу призводить до розшарування бензин-спиртової суміші.

Зазвичай, зневоднення біоетанолу здійснюють на молекулярних ситах – мікропористих тілах, що вибірково поглинають речовини, молекули яких менші, ніж розміри мікропор. Процес зневоднення на молекулярних ситах відбувається таким чином: парова фаза (що складається з води та етанолу) надходить в між трубний простір апарата зневоднення; водяна пара проходить крізь керамічну трубку з цеолітовим наповненням і захоплюється вакуумним насосом, а пара етанолу (молекули якого більше, ніж пори сита) виходить з апарата і прямує до конденсатора зневодненого етанолу.

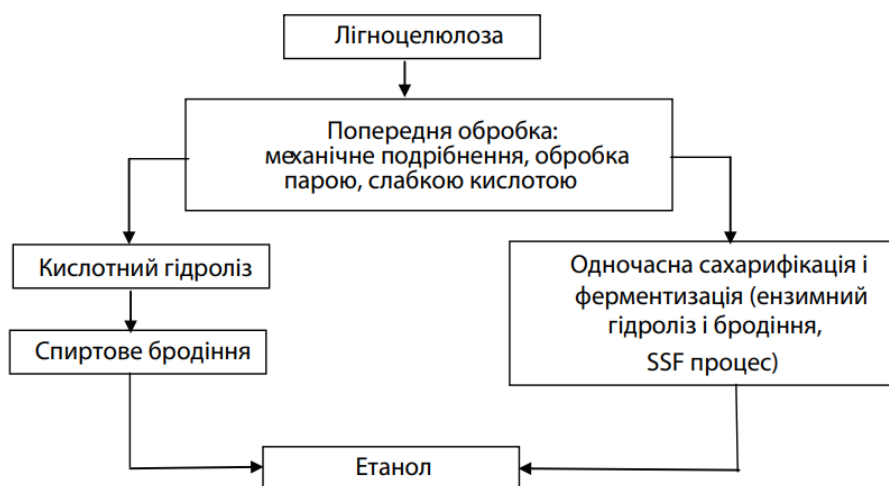


Рис.3.4. Технологічні особливості переробки клітковини в етиловий спирт паливного призначення

Технологічна характеристика якісних показників паливного етилового спирту для утворення бензин-спиртової суміші наведений у табл. 3.1

Таблиця 3.1

**Якісні показники біоетанолу**

№ п/п	Назва показника	Норма показника
1.	Зовнішній вигляд та колір	Прозора безбарвна рідина або світло жовтого забарвлення
2.	Густина за температури (20±0,1)0С, кг/м <sup>3</sup>	від 787 до 792
3.	Об'ємна частка води,%, не більше	0,2
4.	Масова концентрація сухого залишку, мг/дм <sup>3</sup> , не більше	100
5.	Об'ємна частка спирту етилового (органічних кисневмісних сполук),%, не менше	97,8 98,3
6.	Об'ємна частка метанолу,%, не більше	1,0
7.	Об'ємна частка циклогексану,%, не більше	0,5
8.	Масова частка кислот, у перерахунку на оцтову кислоту,%, не більше	0,007
9.	Масова концентрація вищих спиртів C <sub>3</sub> - C <sub>5</sub> , г/дм <sup>3</sup> , не більше	12,0
10.	Об'ємна частка бензину (вуглеводнів),%	від 1,0 до 1,5
11.	Масова частка сірки, мг/кг, не більше	10,0
12.	Масова концентрація фосфору, мг/дм <sup>3</sup> , не більше	0,5
13.	Масова частка міді, мг/кг, не більше	0,1
14.	Масова концентрація неорганічних хлоридів, мг/дм <sup>3</sup> , не більше	20,0

### 3.2. Особливості ферментації субстрату з відходів кукурудзи продуцентами біоетанолу

Підвищення конкурентоспроможності спирту харчового і технічного призначення досягається завдяки впровадженню енерго- та ресурсозберігаючих технологій, удосконалення технологічних процесів, розширення переробки вторинних ресурсів та утилізації відходів виробництва. Однією з найбільш важливих стадій, що визначає ефективність виробництва, є технологія одержання спиртової бражки, яка складається з трьох взаємозв'язаних технологічних операцій – гідроліз крохмалю до моноцукридів, культивування дріжджів та бродіння. Кожна з цих операцій має свій вплив на ефективність переробки крохмальвмісної сировини та показники дозрілої бражки.

В лабораторії були відтворені аналогічні до виробничих умови ферментації дріжджами відходів кукурудзи. Тривалість ферментації із теоретичним синтезом спирту 10%об складав згідно з регламенту тривав 55 годин, а за концентрації 13%об – 75 годин, таблиця 3.2.

Таблиця 3.2.

Фізико-хімічні показники бродильної проби

Показник	Наважка подрібненої сировини, г	
	65	85
Вміст спирту, % об.	9,8	12,6
Загальний вміст незброджених вуглеводів, г/100см <sup>3</sup>	0,478	0,536
Водорозчинні вуглеводи, г/100см <sup>3</sup>	0,374	0,416
Нерозчинений крохмаль, г/100см <sup>3</sup>	0,09	0,11
Вміст декстринів, г/100см <sup>3</sup>	0,19	0,20
Спирторозчинні вуглеводи, г/100см <sup>3</sup>	0,157	0,196
Істинний вміст сухих речовин, %	3,0	4,1
Вміст гліцерину, г/100см <sup>3</sup>	0,83	0,95
Вихід спирту з тони сировини, дал	37,69	37,06
Вміст цукру, введеного на бродіння, г	37,11	47,52
Втрати з незбродженим цукром, % від введеного на бродіння	3,22	2,82

Аналізуючи вищезазначені показники, можна зробити висновок, що підвищення вмісту спирту до 12,6%об призвело до зменшення його виходу з тони сировини на 0,63 Дал. Зниження втрат з незбродженим цукром в бродильній пробі з вищим вмістом спирту пояснюється більшою тривалістю бродіння. Вміст гліцеролу за умов збродження сусла підвищеної концентрації сухими дріжджами зростає на 11,8% порівняно зі збродженням сусла з вмістом сухих речовин на рівні 17,5-18%.

Було проведено порівняння збродження сусла з відходів кукурудзи з використанням сухих дріжджів закордонної селекції та штаму ДС-01-Е. Для цього експериментальний штам розмножили через систему апаратів чистої культури (АЧК) та дріжджегенераторів та передали в бродильний апарат №4. У бродильному апараті №9 використовували сухі дріжджі Thermosacc® Dry (рис. 3.5)

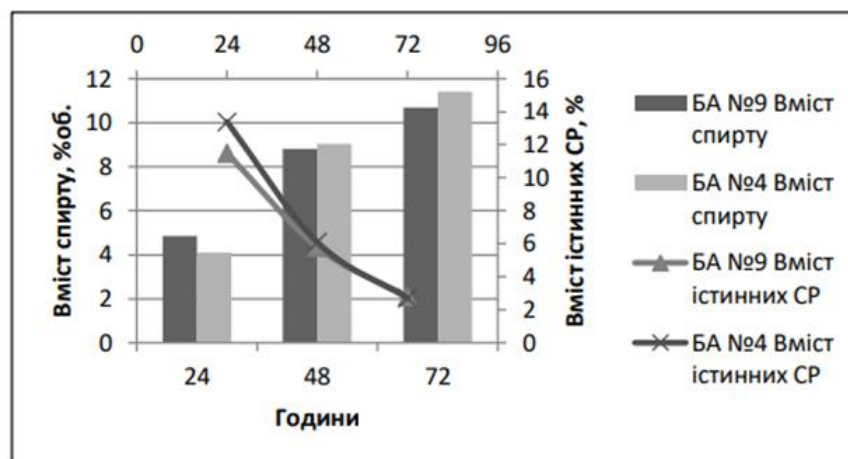


Рис. 3.5. Динаміка вмісту спирту та істинних СР в БА №9 та №4

Процес ферментації відходів кукурудзи проводили двома штамами дріжджів (експериментальним штамом чистої культури та селекційним закордонним штамом сухих дріжджів), що доби проводили контрольні заміри. Динаміка синтезу етилового спирту та вмісту сухої речовини наведені на рис. 3.5, а динаміка вмісту вільних не проферментованих цукрів та трьохатомного спирту – гліцеролу наведена на рис. 3.6.

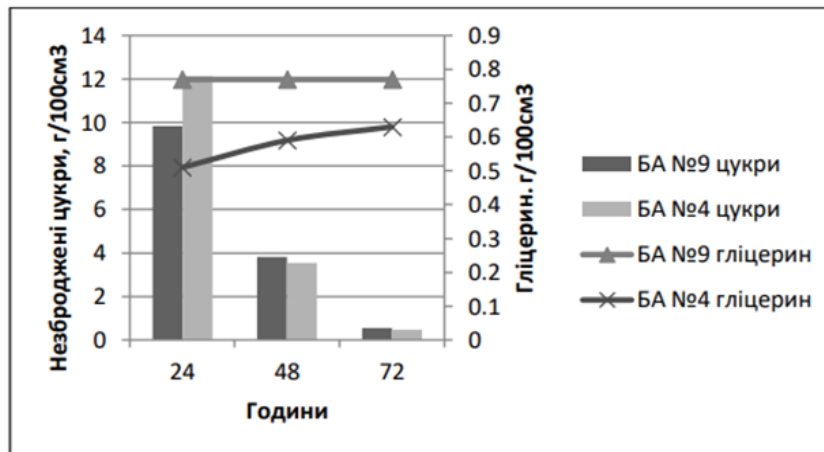


Рис. 3.6. Динаміка вмісту розчинних цукрів та гліцеролу в бродильних апаратах №9 та №4

Слід зазначити, що експериментальні дріжджі, що були введені в бродильний апарат №4, в АЧК культивувались за температур ( $\geq 36^{\circ}\text{C}$ ), що негативно позначилось на бродильній активності дріжджів. Це спричинило уповільнення швидкості зброджування на стадії головного бродіння. Однак вже на другу добу вміст спирту в бражці БА №4 був вищим на 2,8%, а на третю добу – на 6,5% у порівнянні з БА, в який було введено розчин із сухих дріжджів.

Динаміка не використаних цукрів штамами дріжджів на 24 годину експерименту в першому зразку (експериментальні дріжджі) була на 17,4% вищою порівняно із другим зразком, де використовували дріжджі закордонної селекції. Однак, на 48, а особливо на 72 добу різниці між використанням цукрів із бражки досліджуваними популяціями дріжджів не було поміченим.

Накопичення гліцеролу в бродильному апараті №9 вже в першу добу на рівні  $0,77 \text{ г/100см}^3$  вказує на те, що дріжджі зазнають певного осмотичного стресу, цей показник є стабільним впродовж всього періоду бродіння. Щодо БА №4, то вміст гліцерину в ньому незначно зростав у порівнянні з першою добою. Однак, загалом вміст гліцеролу в зрілій бражці при використанні в якості продуценту експериментального штаму був нижчим на 18,2% порівняно з сухими дріжджами.

Таблиця 3.3

Фізико-хімічна характеристика якості зрілої бражки за ферментації за використання сухих дріжджів та експериментальних дріжджів

Показник	Бродильний апарат	
	Сухі дріжджі (БА №9)	Експериментальні дріжджі (БА №4)
Вміст спирту, % об.	10,70	11,40
Загальний вміст незброджених вуглеводів, г/100см <sup>3</sup>	0,56	0,48
Водорозчинні вуглеводи, г/100см <sup>3</sup>	0,45	0,46
Нерозчинений крохмаль, г/100см <sup>3</sup>	0,09	0,02
Вміст декстринів, г/100см <sup>3</sup>	0,21	0,26
Спирторозчинні вуглеводи, г/100см <sup>3</sup>	0,24	0,17
Істинний вміст сухих речовин, %	+2,8	+2,7
Вміст гліцерину, г/100см <sup>3</sup>	0,77	0,63
Вміст цукру, введеного на бродіння,	17,07	18,07
Втрати з незбродженим цукром, % від введеного на бродіння	3,28	2,66

Як видно з таблиці 3.3, експериментальні дріжджі характеризувались нижчим рівнем накопичення гліцерину в зрілих бражках (0,57-0,63 проти 0,77-0,95 г/100см<sup>3</sup>), більш глибоким ступенем збродження вуглеводів сировини (2,10-2,66 проти 2,64-3,28 г/100 см<sup>3</sup>). Окрім цього, зменшення вмісту незброджених вуглеводів в бражці був спричинений зменшенням вмісту водорозчинних вуглеводів з 0,21-0,24 г/100см<sup>3</sup> до 0,08-0,17 г/100см<sup>3</sup>бражки.

## ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано сучасний стан виробництва біоетанолу в Україні та світі, подана характеристика сировини, яка використовується для виробництва спирту та мікроорганізми-продуценти.

2. Вибрано ферментер для біосинтезу цільового продукту, визначено методи контролю процесу ферментації та можливість його автоматизації. Наведений опис апаратурно-технологічної схеми виробництва біоетанолу при спиртовому зброджуванні м'ясного суслу в періодичному і безперервному процесах.

3. Проаналізовано технологічні особливості одержання етилового спирту паливного призначення із клітковини та інших органічних відходів АПК. Особливості даної технології зводиться до того, що одержаний продукт – етиловий спирт необхідно додатково зневоднити, бо додавання до бензину 96% етанолу призводить до розшарування бензин-спиртової суміші.

4. Встановлено, що експериментальний штам дріжджів у виробничих умовах забезпечував вищий вміст спирту в бражці на 6,5%, за рахунок зменшення накопичення гліцеролу. Отримані результати свідчать про доцільність заміни сухих дріжджів закордонної селекції експериментальним штамом.

5. Виробництво біоетанолу із м'яси на теренах Західної України можна вважати доцільним та економічно вигідним, перш за все через близьке розташування сировинної бази.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Цілі сталого розвитку Україна: добровільний національний огляд / Департамент стратегічного планування та макроекономічного прогнозування. К. 2020. 117 с.
2. Гелетуха Г.Г. Стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні [Електронний ресурс]/ Г.Г. Гелетуха. Режим доступу: [www.uabio.org%2Fuabionews%2F3837-geletukha-presentation-agropetrol2019&usg=AOvVaw06Ew1lbKGLfcRi1ox8aw bL](http://www.uabio.org%2Fuabionews%2F3837-geletukha-presentation-agropetrol2019&usg=AOvVaw06Ew1lbKGLfcRi1ox8aw bL)
3. 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.
4. Сичевський М. П. Біосинтез етилового спирту різними расами дріжджів в умовах підвищеної концентрації сусле / М. П. Сичевський, С. Т. Олійнічук, К. О. Данілова. // Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2016. № 5.
5. Гунчак Т. І. Особливості вирощування сорго цукрового в якості сировини для виробництва біопалива в умовах Південно-західного Лісостепу України / Т. І. Гунчак // Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків. 2014. Вип. 21. С. 240-244.
6. Калетнік Г.М. Альтернативна енергетика України: особливості функціонування і перспективи розвитку: монографія [Калетнік Г.М., Олійнічук С.Т., Скорук О.П. та ін.] / Вінницький нац. аграрний ун-т. Вінниця: Вінницький нац. аграрний ун-т. 2012. 250 с.
7. Олійнічук, С. Т. Спиртове виробництво та енергетична безпека України [Текст] / С. Т. Олійнічук, Н. С. Коткова // Економіка АПК. 2014. № 4. С. 61-68.
8. Климчук О.В., Висоцька В.В. Виробництво біоетанолу – перспективна галузь в Україні / Климчук О.В., Висоцька В.В.// Збірник наукових праць ВНАУ №1(56). Том 3. 2012. С. 98-103.

9. Система використання біоресурсів у новітніх біотехнологіях отримання альтернативних палив. Блюм Я.Б., Григорюк І.П., Дмитрук К.В. та ін. К.: Аграр Медіа Груп, 2014. 360 с.

10. Зануда А. Біопаливо – черговий шанс для України [Електронний ресурс] / А. Зануда. – Режим доступу: [http://www.bbc.co.uk/ukrainian/business/2011/04/110405\\_bioenergy\\_az\\_ob.shtml](http://www.bbc.co.uk/ukrainian/business/2011/04/110405_bioenergy_az_ob.shtml)

11. Осадчук В. Д. Вирощування енергетичних багаторічних злакових трав та сорго цукрового в умовах Буковини / [ В. Д. Осадчук, Т. І. Гунчак, Л. І. Мікус, О. М. Крижанівський] // Екологічні проблеми традиційних і альтернативних видів енергії. Горбуновські читання. Чернівці: ЧФ НТУ «ХП», 2014. С. 93-95.

12. Внукова Н. В. Альтернативне паливо як основа ресурсозбереження і екобезпеки автотранспорту / Н. В. Внукова, М. В. Барун // Альтернативные источники энергии. 2011. № 9. (91). С. 45–55.

13. Калетнік Г.М. Біопаливо: ефективність його виробництва та споживання в АПК України: навч. посібник/ Г.М. Калетнік, В.М. Пришляк. К: «Хай-Тек Прес». 2010. 312 с.

14. Золотарьова О. Куди прямує біопаливна індустрія?/Золотарьова О., Шнюкова Є. // Вісник НАН України, 2010. № 4. С. 10-20.

15. Гойсюк Л.В. Економічна ефективність виробництва сировини для переробки на біопаливо / Л.В. Гойсюк // Економіка АПК. 2010. № 6. С. 46.

16. Паламарчук І. П. Обґрунтування технології та обладнання для попередньої обробки крохмалевмісної сировини при виробництві спирту / І. П. Паламарчук, В. П. Янович, І. М. Купчук // Вібрації в техніці та технологіях. 2013. № 4 (72). С. 112–116.

17. 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.

18. Chi K., Catchmark J.M. Improved eco-friendly barrier materials based on crystalline nanocellulose/chitosan/carboxymethyl cellulose polyelectrolyte complexes, *Food Hydrocoll.* 2018, 80, 195–205, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.02.003>

19. Інтернет ресурс: <http://www.ethanolrfa.org/news/entry/global-ethanolproduction-to-reach-85.2-billion-litres-in-2012/>

20. Коденська М. Доцільність виробництва етанолу з вихідної продукції цукробурякової галузі / М. Коденська // Збірник наукових праць Вінницького НАУ. Вип. 42. Т. 2. 2010. С. 50-55.

21. Климчук О.В., Висоцька В.В. Виробництво біоетанолу-перспективна галузь в Україні / Климчук О.В., Висоцька В.В. // Збірник наукових праць ВНАУ №1(56) Том 3 2012 С. 98-103.

22. Industry Statistic World Fuel Ethanol Production [Virtual Resource] / Access Mode: URL: <http://ethanolrfa.org/resources/industry/statistics/#1454098996479-8715d404-e546>. Title from Screen/ - Date of Access: 28 February 2017.

23. 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.

24. Третяк В.М., Больбут В.С., Ганженко О.М., Мазуренко А.М. Ефективність використання пального рослинного походження для живлення двигунів внутрішнього згорання сільськогосподарських машин. Збірник наукових праць ІБКіЦБ. 2013. №19. С.163-167.

25. 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/> (дата звернення: 20.02.2022).

26. 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>

27. Селінний М.М. Світові тенденції виробництва біопалива. Агроінком. 2013. №1-3. С. 60-62.

28. Кусяк Г. Т. Використання цукрового сорго, як біоенергетичної культури при виробництві біоетанолу / [ Г. Т. Кусяк, Ю. А. Думанська, В. А. Кучерява, Н. М. Омельченко] // Екологічні проблеми традиційних і альтернативних видів енергії. Горбуновські читання. Чернівці: ЧФ НТУ «ХП», 2014. С. 56-58

29. Шевченко І. Л. Аспекти використання біоетанолу як альтернативного джерела енергії // Цукрові буряки. 2009. №3. С. 14 – 15.

30. Українець А. Спиртова галузь на шляху до інноваційного розвитку / А. Українець, Л. Хомічак, П. Шиян, С. Олійничук // Харчова і переробна промисловість. 2007. № 12. С. 16-19.

31. Михайлов Ю. Друга кукурудзяна авантюра // Пропозиція. 2007. №5. С. 20–22.

32. Зброджування сула підвищеної концентрації з крохмалевмісної сировини С.Т. Олійничук, Т.І. Лисак, О.О. Коваль. . Продовольчі ресурси: збірник наукових праць / НААН; Ін-т прод. Ресурсів НААН 2016. №7 ст. 139-143.

## ДОДАТКИ

### Додаток А

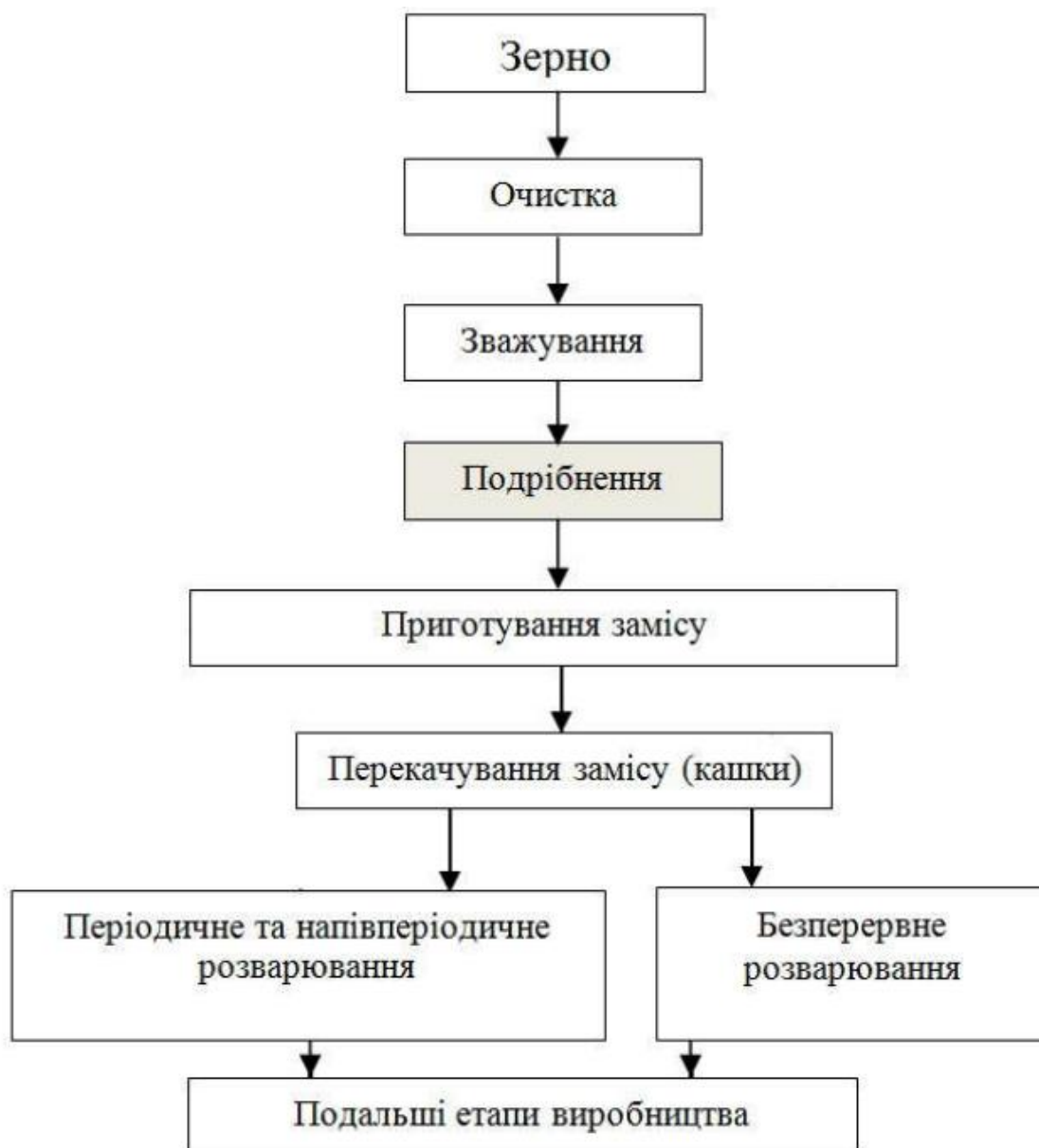
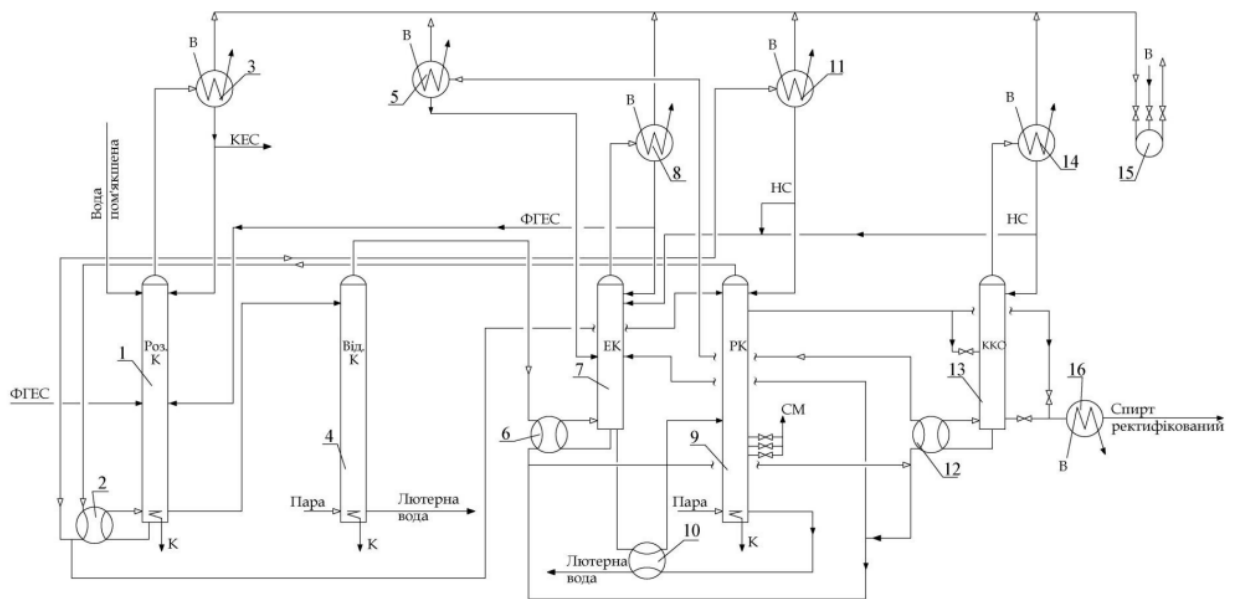
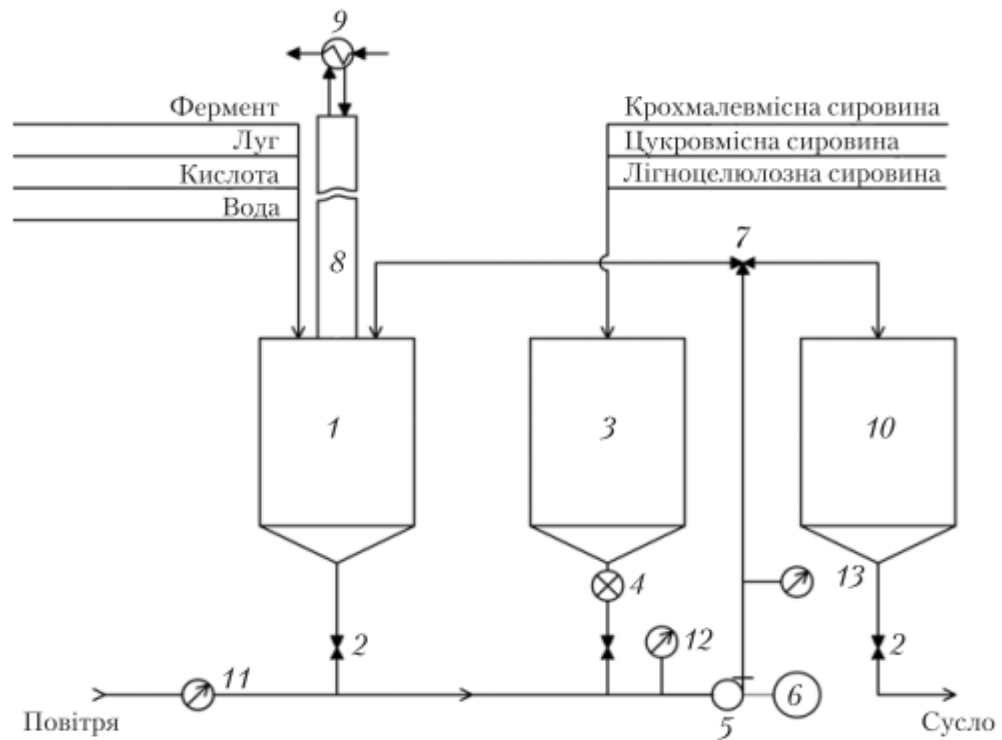


Схема підготовчого етапу технологічного процесу виробництва етанолу



Принципова технологічна схема енергозбережної установки для переробки фракції головної етилового спирту



Апаратурно-технологічна схема приготування сусла в технології біоетанолу:

- 1 - приймальний бункер; 2 - двоходовий кран; 3 - бункер для подачі сировини; 4 - дозатор; 5 - роторно-пульсаційний апарат; 6 - електродвигун; 7 - триходовий кран; 8 - ректифікаційна колона; 9 - дефлегматор; 10 - збірник готового сусла; 11 - ротаметр; 12 - вакуумметр; 13 - манометр