

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

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

Факультет харчових технологій та біотехнології

(повна назва факультету)

Кафедра біотехнологій та радіології

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістр

на тему: “Розробка оптимальних параметрів біоконверсії
лігноцелюлозного субстрату у біопаливо (бутанол)”

Виконав: студент _2_ курсу, групи _1_
спеціальності

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

Мелех Роман Романович

(прізвище та ініціали)

Керівник: **проф. Буцяк В.І.**

(прізвище та ініціали)

Рецензент: **Філіппов С.І.**

(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**

Мелеха Романа Романовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи “Розробка оптимальних параметрів біоконверсії лігноцелюлозного субстрату у біопаливо (бутанол)”

Керівник магістерської роботи

Буцяк Василь Іванович, 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: біоконверсія, бутанол, лігноцелюлозовий субстрат, живильне середовище, ферментер, штамп-продуценти, оптимізація, окремі ланки технологічного процесу, поновлювані джерела енергії.

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:

основні види лігніноцелюлозної біомаси – відходів сільськогосподарського виробництва, будова структурних компонентів лігніну, структурна формула геміцелюлози, біохімізм процесу промислової АВЕ-ферментації, життєвий цикл розвитку клостридій, динаміка синтезу бутанолу залежно від подрібнення базового субстрату, модель просторового контакту ферментних систем клостридій із лігноцелюлозним субстратом, інтегральний підхід до біотехнологічного процесу виробництва бутанолу із лігніноцелюлозних субстратів, метаболічні процеси ферментації клостридіями лігноцелюлозу із одержанням біобутанолу.

Схеми: схема будови молекули целюлози, схема ацетоно-бутанол-етанольної ферментації, метаболічні шляхи перетворення глюкози, типи АВЕ-ферментації, які використовуються в промисловому виробництві бутанолу, принципова технологічна схема виробництва біобутанолу за ферментації лігноцелюлозного субстрату, схема кислотного гідролізу базового субстрату.

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. Буцяк В.І.		
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

_____ **Роман МЕЛЕХ**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник магістерської роботи

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

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	5
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	11
1.1. Перспектива використання лігноцелюлозної біомаси у виробництві біопалива	11
1.2. Попередня обробка лігноцелюлозної сировини як субстрату для синтезу біобутанолу	16
1.2.1. Основні методи попередньої обробки лігноцелюлозної сировини	21
1.3. Вимоги щодо дотримання оптимальних параметрів процесу біоконверсії лігніноцелюлозних субстратів у бутанол	25
1.4. Екологічні та економічні аспекти виробництва бутанолу із лігніноцелюлозної сировини	28
РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	31
2.1. Хімізм біоконверсії лігноцелюлози з метою одержання біопалива – біобутанолу	31
2.2. Матеріал і методи	35
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	38
3.1. Оптимізація структури лігноцелюлозного субстрату та окремих ланок технологічного процесу виробництва біобутанолу	38
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	55
ДОДАТКИ	59

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота обсягом 63 сторінках, складається із вступу огляду літературних джерел, матеріал та методів досліджень, власних досліджень, висновків та пропозицій, списку літератури, додатків та містить 40 літературних джерел, 23 рисунків, 7 таблиць та 5 додатків.

Ключові слова: біоконверсія, бутанол, лігноцелюлозовий субстрат, живильне середовище, ферменер, штами-продуценти, оптимізація, окремі ланки технологічного процесу, поновлювані джерела енергії.

Дана робота на тему: “Розробка оптимальних параметрів біоконверсії лігноцелюлозного субстрату у біопаливо (бутанол)”, виконана на кафедрі біотехнології та радіології. В ході дослідження було детально розглянуто сучасні методи попередньої обробки лігноцелюлозної сировини – від кислотного та лужного гідролізу до застосування інноваційних фізико-хімічних технологій (вибуховий розпад, іонні рідини, озоноліз, надкритичні флюїди тощо). Також було проаналізовано ефективність ферментативного гідролізу та мікробних конверсій із залученням високопродуктивних штамів бактерій *Clostridium acetobutylicum*, здатних здійснювати ацетоно-бутано-етанолове (ABE) бродіння.

Особливу увагу було приділено визначенню та оптимізації ключових параметрів процесу: температури, рН середовища, концентрації субстрату, наявності інгібіторів, швидкості ферментації, тривалості стадій, а також складу поживних середовищ. Отримані результати свідчать, що навіть незначна варіація цих чинників може суттєво вплинути на вихід бутанолу та супутніх метаболітів. Тому для масштабного промислового застосування необхідно розробити та стандартизувати універсальні моделі контролю процесу біоконверсії.

Об'єкти дослідження – процес біоконверсії лігноцелюлозної біомаси до бутанолу шляхом мікробного зброджування.

Предмет дослідження – оптимальні технологічні параметри (рН, температура, попередня обробка, концентрація субстрату, час гідролізу, склад живильного середовища, штами продуцентів) біоконверсії для максимізації продуктивності бутанолу.

Метою роботи – розробка і науково обґрунтована оптимізація технологічних параметрів біоконверсії лігноцелюлозного субстрату у біопаливо – біобутанол.

Завданнями дослідження було:

- проаналізувати доступні наукові розробки щодо перспектив використання та удосконалення технологічних процесів виробництва біопалива із використанням лігноцелюлозної біомаси як базового субстрату;
- дослідити основні методи попередньої обробки лігноцелюлозної сировини та вимоги щодо дотримання оптимальних параметрів процесу біоконверсії лігноцелюлозних субстратів у бутанол;
- провести комплексний аналіз властивостей субстрату, вибір ефективних методів його підготовки, підбір мікроорганізмів та визначення найсприятливіших умов ферментації, а також оцінка результатів біоконверсії за допомогою сучасних аналітичних методів;
- подати регламентні принципові технологічні схеми та апаратурне забезпечення виробництва біобутанолу із лігноцелюлозного субстрату із використанням штамів клостридій як продуцентів;
- охарактеризувати екологічні та економічні аспекти виробництва бутанолу із лігноцелюлозної сировини за ацетон-бутанол-етанолового ферментного процесу.

Актуальність теми. Сучасна енергетична система світу переживає глибоку трансформацію, пов'язану з вичерпністю викопних ресурсів, підвищеною вартістю енергоносіїв та глобальними екологічними викликами, зокрема змінами клімату та забрудненням навколишнього середовища. У цьому контексті пошук сталих, екологічно безпечних та економічно доцільних джерел енергії набуває пріоритетного значення для всього людства. Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку є виробництво біопалива нового покоління, серед якого особливе місце займає біобутанол, отриманий шляхом біоконверсії лігноцелюлозної сировини.

Актуальність досліджень обумовлена необхідністю розробки сучасних технологій виробництва біопалива III покоління, які базуються на ефективному використанні лігноцелюлозної біомаси. Впровадження таких технологій сприятиме зниженню залежності від викопних енергоресурсів, поліпшенню екологічної ситуації та стимулюванню розвитку біоекономіки.

Науковий внесок роботи. У підсумку, результати цього дослідження підкреслюють реальний потенціал лігноцелюлозної біомаси як стратегічної сировини для сталого виробництва бутанолу – вискоєфективного, екологічного біопалива третього покоління. Визначені оптимальні параметри біоконверсії можуть стати основою для розробки промислових технологічних схем, інтегрованих в енергетичну, сільськогосподарську та переробну інфраструктуру країни.

Практична цінність роботи. Кислотний гідроліз базового субстрату 1% розчином сульфатної кислоти сприяє гідролізу, в основному, геміцелюлози, вміст якої зменшився на 14,3% порівняно до контролю із одночасним зростанням на 5,2% кількості редукуючи речовин (легкозброджуваних вуглеводів). Додаткова термічна обробка побрібненої

соломи як лігноцелюлозного субстрату гострою водяною парою сприяє збільшенню утворенню бутилового спирту на 14,3% порівняно із субстратом, який не піддавався термічній обробці в процесі АВЕ-ферментації.

ВСТУП

В умовах глобальних екологічних викликів, зростання енергетичного споживання та виснаження традиційних невідновлюваних джерел енергії, питання розвитку альтернативних видів палива набуває стратегічного значення для багатьох країн світу. Використання викопного палива призводить до накопичення парникових газів, що спричиняє кліматичні зміни та деградацію навколишнього середовища.

Водночас залежність світової економіки від нафти, вугілля та природного газу викликає нестабільність енергетичних ринків через коливання цін і геополітичні фактори. У зв'язку з цим, пошук і впровадження поновлюваних, екологічно чистих джерел енергії стає одним із пріоритетних завдань наукової спільноти [2].

Одним із перспективних напрямів у сфері поновлюваної енергетики є біопаливо, яке виробляється з біомаси. Серед біопалив особливої уваги заслуговують біобутанол та біоетанол – спиртові види палива, що можуть ефективно замінити традиційні види моторного палива або використовуватися як їх компоненти.

Біобутанол, порівняно з біоетанолом, має вищу енергетичну цінність, кращу сумісність із двигунами внутрішнього згоряння, нижчу корозійну активність та меншу гігроскопічність. Ці переваги роблять його особливо привабливим для промислового виробництва та впровадження у транспортну галузь [1].

Оптимізація параметрів біоконверсії є ключовою складовою ефективного та економічно вигідного виробництва біобутанолу. Це передбачає вивчення та налагодження технологічних умов: температури, рН, часу ферментації, концентрації субстрату та інокулюму, а також вибір відповідних штамів мікроорганізмів-продуцентів. Підвищення продуктивності процесу дозволить знизити витрати на сировину, енергетику

та обладнання, зменшити екологічний слід і покращити якість отриманого продукту [3].

Важливою також є оцінка екологічної та економічної ефективності впровадження біобутанолу як альтернативного палива. Застосування біобутанолу сприяє скороченню викидів парникових газів, зменшенню забруднення повітря та підвищенню енергетичної безпеки країн. У той же час необхідно враховувати потенційні виклики, пов'язані із конкуренцією за сировину між продовольчою і паливною промисловістю, технологічними складнощами переробки лігноцелюлозних матеріалів та регуляторними обмеженнями.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Перспектива використання лігноцелюлозної біомаси у виробництві біопалива

Лігноцелюлозна біомаса, яка включає в себе відходи сільського господарства (солома, кукурудзяні стебла, рисове лушпиння), лісові відходи (тирса, гілля, кора) та інші органічні матеріали, становить одну з найбільш перспективних сировин для виробництва біопалива II та III покоління (рис.1.1).



Рис. 1.1. Основні види лігноцелюлозної біомаси – відходів сільськогосподарського виробництва [4]

За даними International Energy Agency (IEA, 2021), світовий потенціал лігноцелюлозної сировини перевищує 3 млрд тонн на рік, і лише невелика її частка використовується для енергетичних потреб. Лігноцелюлоза складається з трьох основних полімерів: целюлози, геміцелюлози та лігніну (рис. 1.2-1.4), кожен з яких вимагає специфічного підходу до гідролізу та подальшої ферментації.

Дослідження демонструють, що використання саме лігноцелюлозної сировини дозволяє уникнути конкуренції з харчовими культурами (на відміну від біоетанолу з кукурудзи або біодизелю з сої), і вважається

екологічно сталим підходом до біопаливної трансформації (Sanchez & Cardona, 2008; Limayem & Ricke, 2012).

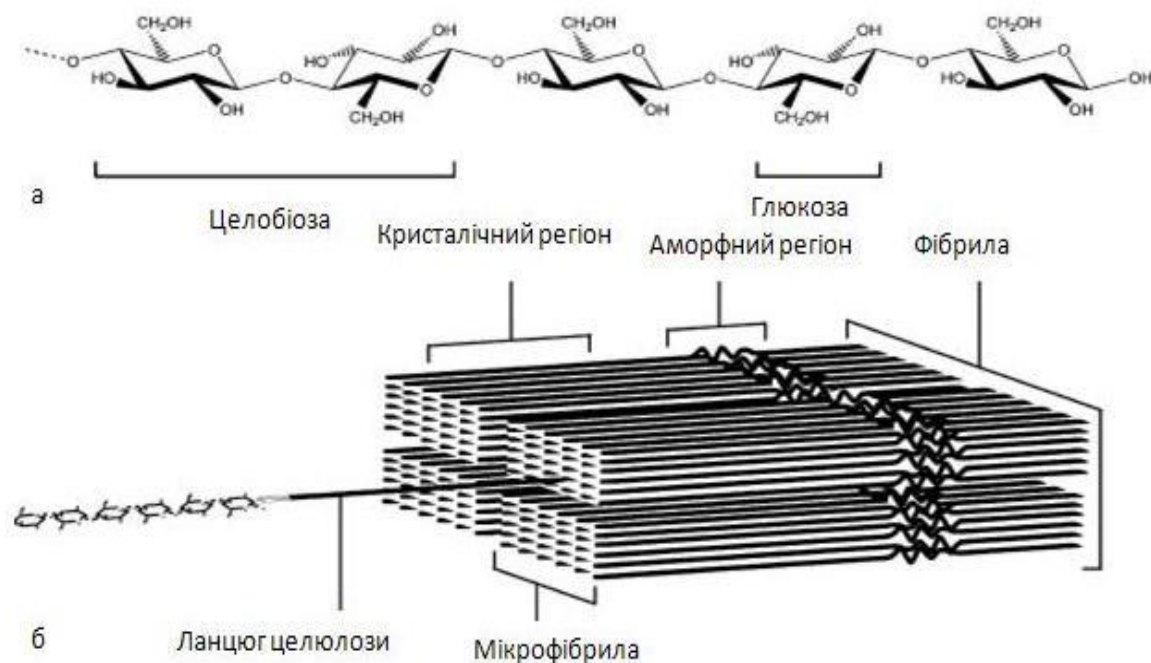


Рис. 1.2. Схема будови молекули целюлози [5].

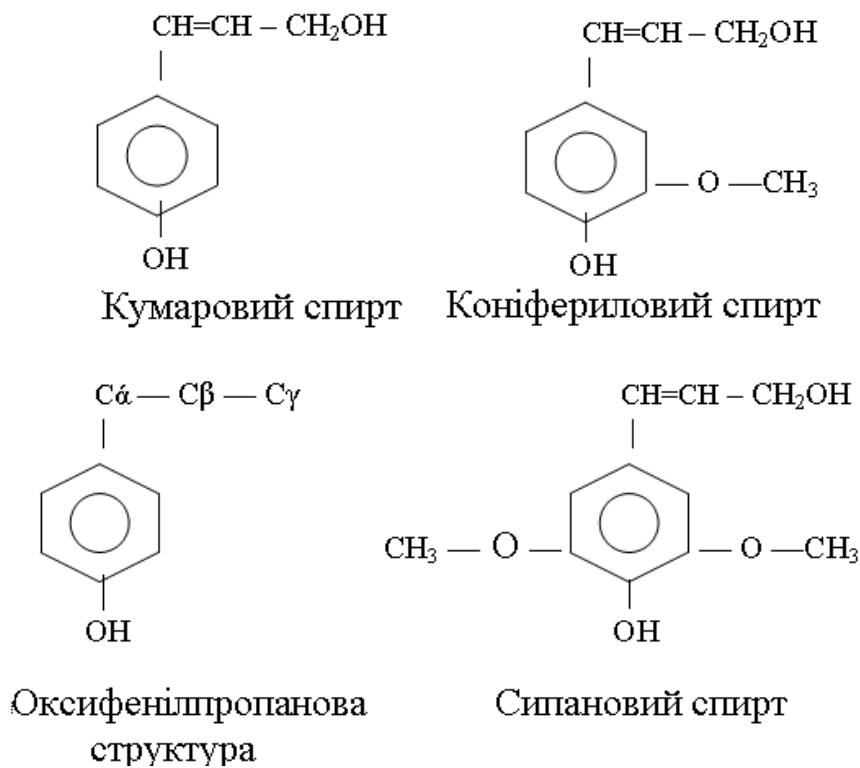
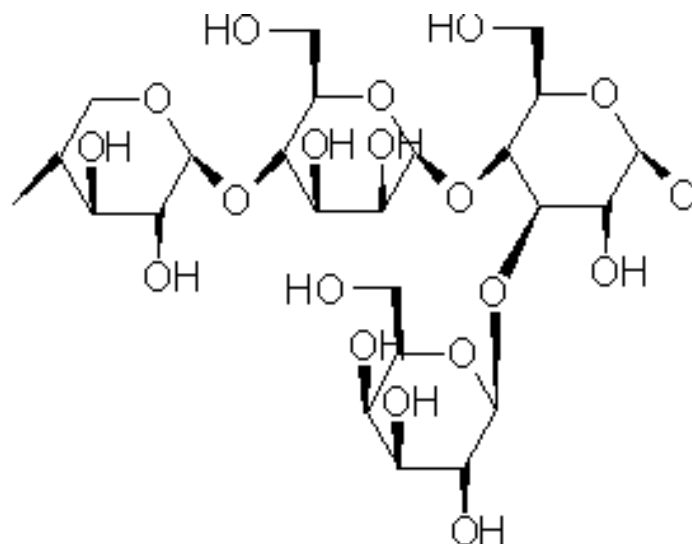


Рис. 1.3. Будова структурних компонентів лігніну.



Xylose - β (1,4) - Mannose - β (1,4) - Glucose -
- α (1,3) - Galactose

Hemicellulose

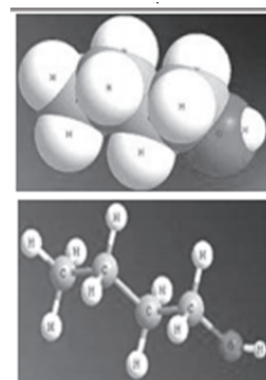
Рис.1.4. Структурна формула геміцелюлози

Бутанол, зокрема *n*-бутанол, є перспективним біопаливом IV покоління. Його енергетична щільність (29.2 МДж/л) наближається до бензину (32 МДж/л) і перевищує відповідні показники етанолу (21 МДж/л), що робить його більш ефективним паливом (Qureshi et al., 2008) (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Фізико-хімічні характеристики бутанолу [6].

Температура плавлення ($^{\circ}\text{C}$)	89,3
Молярна маса	74,12 г/моль
Температура запалювання ($^{\circ}\text{C}$)	36
Температура самозапалювання ($^{\circ}\text{C}$)	343-345
Температура спалаху ($^{\circ}\text{C}$)	25
Відносна щільність (вода: 1,0)	0,81
Критична температура ($^{\circ}\text{C}$)	287
Межі вибуху (% у повітрі)	1,4-11,3
Розчинність у воді	9,0 моль на 100 моль (7,7/100 моль при 20°C)



Крім того, бутанол може бути змішаний з бензином у будь-якому співвідношенні без модифікації двигунів, на відміну від етанолу, що потребує зміни паливних систем. Його менша гігроскопічність і летючість робить бутанол більш придатним до зберігання і транспортування (Lee et al., 2008) (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

Порівняльна фізико-хімічна характеристика основних видів палива метанолу, етанолу, бутанолу та бензину [7].

Властивості	Види палива			
	Бутанол	Бензин	Етанол	Метанол
Точка кипіння (°C)	117-118	27-221	78	64,7
Щільність при 20 °C (г/мл)	0,8098	0,7–0,8	0,7851	0,7866
Розчинність в 100 г води	-	-	+	+
Щільність енергії (МДж·л ⁻¹)	27-29,2	32	19,6	16
Вміст енергії/значення (БТЕ/галон)	110000	115000	84000	76000
Співвідношення повітря та паливо	11,2	14,6	9	6,5
Теплота паротворення (МДж/кг)	0,43	0,36	0,92	1,2
Рідкі теплоємності (Ср) на СТП	178	160-300	112,3	81,14
Теоретичне октанове число	96	91-99	129	136
Моторне октанове число	78	81-89	102	104
Коефіцієнт розподілу октанол/вода (як log _{р_о/в})*	0.88	3,52	- 0,31	- 0,77
Дипольний момент (полярність)	1,66	-	1,7	1,6
В'язкість (10 ⁻³ Па)	2,593	0,24-0,32	1,078	0,5445

* Примітка: Log_{р_о/в} є мірою гідрофобності (ліпофільності).

Бутанол у промислових масштабах отримують хімічним синтезом, де як базовий субстрат використовують ацетальдегід чи пропілен за схемами відомими під назвами Оксо та Репе із використанням ферменту кротонілдегідрогідрогенази (рис. 1.5).

1.2. Попередня обробка лігноцелюлозної сировини як субстрату для синтезу біобутанолу

Один з ключових етапів у виробництві бутанолу з лігноцелюлозної сировини – це ефективна попередня обробка субстрату. Основна мета цього процесу – руйнування жорсткої структури лігніну, щоб забезпечити доступ мікроорганізмів або ферментів до целюлози та геміцелюлози. Серед найпоширеніших методів: кислотний гідроліз (Taherzadeh & Karimi, 2007), парова вибухова обробка (steam explosion), лужна та ферментативна деструкція [8].

Кожен метод має свої переваги і недоліки. Наприклад, кислотна обробка є ефективною, але спричиняє утворення інгібіторів (фурфуролу, HMF), які заважають подальшій ферментації. У цьому контексті дослідження Xia et al. (2012) та Wyman et al. (2011) пропонують комбінацію хімічної та біологічної обробки для зменшення токсичності середовища.

Біоконверсія цукрів у бутанол здійснюється анаеробними бактеріями роду *Clostridium*. Історично найбільше досліджень було проведено на штамі *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824. Але з розвитком генетичної інженерії з'явилися модифіковані штами, які мають вищу продуктивність, краще переносять інгібітори та менше продукують побічні продукти (Dürre, 2008).

Поряд з *Clostridium*, активно досліджується використання інших бактерій та грибів, зокрема *Thermoanaerobacterium*, *Geobacillus* і навіть генетично змінених штамів *Escherichia coli*, здатних ферментувати як пентози (ксилоза, арабіноза), так і гексози.

Процес ферментації має бути оптимізований за такими параметрами [9]:

- рН середовища (оптимально 5.5–6.5);
- температура (30–37°C);
- концентрація субстрату;
- період анаеробного зброджування;

- виведення кінцевих продуктів (бутанолу) для запобігання його токсичній дії.

Дослідження Lee et al. (2012) показали, що видалення бутанолу з ферментативного бульйону шляхом пермеації мембран дозволяє підвищити його кінцеву концентрацію на 40–60%.

Згідно з публікаціями Humbird et al. (2011) та Jin et al. (2017), виробництво бутанолу з лігноцелюлозної сировини має потенціал стати економічно рентабельним при впровадженні технологій рекуперації енергії, масштабуванні біореакторів та використанні побічних продуктів (біомаса клітин, залишковий лігнін).

Промислові компанії, як-то Gevo, Cobalt Technologies, Butamax Advanced Biofuels інвестували значні кошти у розробку біобутанолу. Деякі пілотні проекти успішно показали можливість комерційної експлуатації лігноцелюлозної сировини (наприклад, у США, Китаї, Бразилії).

Лігноцелюлозна біомаса є найбільш доступним, поновлюваним і недорогим джерелом органічної сировини для біоконверсії в біопаливо. Вона представлена переважно агровідходами, лісовими залишками, енергетичними культурами (наприклад, міскантус, свічграс, тополя, верба), а також промисловими залишками харчової та паперової промисловості. Основною перевагою лігноцелюлозної біомаси є її масова наявність, висока щільність енергії, відсутність конкуренції з харчовими продуктами та здатність утилізувати відходи (табл. 1.3).

Лігноцелюлоза є складною біополімерною матрицею, яка складається головним чином з трьох компонентів:

- целюлоза (35–50%) – полімер глюкози з β -1,4-глікозидними зв'язками. Вона є кристалічною фракцією, стійкою до гідролізу, але має високий потенціал для ферментації після попередньої обробки. Основне джерело цукрів для подальшої ферментації в бутанол;

- геміцелюлоза (20–35%) – гетерогенний полісахарид, що включає ксилан, манан, арабінан тощо. Має аморфну структуру і є легше гідролізованою. Геміцелюлоза забезпечує додаткові цукри (ксилозу, арабінозу), які можуть бути використані для продукування біобутанолу за участю модифікованих штамів;
- лігнін (15–30%) – складний ароматичний полімер, який забезпечує структурну жорсткість біомаси. Лігнін є найбільш стійким до біодеградації компонентом, заважає доступу до целюлози та геміцелюлози, та створює бар'єр для ферментів. Утилізація лігніну є важливою проблемою при переробці.

Таблиця 1.3

Шляхи використання лігніноцелюлозних субстратів [10].

Стадії утворення лігноцелюлозної сировини	Залишки	Шляхи використання
<i>Збирання зернових</i> Пшениці, рису, вівса, ячменю та кукурудзи	Солома, качани, стебла, лушпиння	Корма для тварин, спалюють в якості пального, компост, ґрунтове добриво
<i>Оброблення зерна</i> Кукурудза, пшениця, рис, соя	Стічні води, висівки	Корм для тварин
Переробка овочів та фруктів	Насіння, шкірки, стічні води, лушпиння, каміння, забраковані фрукти та соки	Корм для тварин та риби, деяке насіння для видобутку олії
Цукровий очерет, інші цукрові продукти	Жом	Спалюють в якості пального
<i>Олії та олійні рослини</i> Горіхи, насіння бавовнику, оливки, соя тощо	Лушпиння, оболонки, волокна, фібрили, шлам, макуха, стічні води	Корм для тварин, добрива, спалюють в якості пального
Відходи тваринництва	Гній та інші відходи	Ґрунтове добриво
<i>Лісово-паперова та целюлозна</i> Заготівля деревини	Залишки дерев, кори, листя тощо	Ґрунтове добриво, спалення

продовження табл. 1.3.

Пило- та фанеро матеріали	Тирса, стружка, тріски	Целюлозно-паперова промисловість, ДВП та ДСП
Целюлозо-паперові комбінати	Фібрилові відходи, сульфатні луги	Повторне використання в целюлозній промисловості як пального
Побутові лігноцелюлозні відходи	Старі газети, папір, картон, старі дошки, занедбані меблі	Невеликий відсоток переробки, інші спалюють
Трава	Не утилізована трава	Спалення

Існує кілька основних джерел лігноцелюлозної біомаси [11]:

- сільськогосподарські залишки: солома пшениці, кукурудзяні стебла, лушпиння соняшника, рисова лузга. Вони широко доступні, особливо в регіонах з розвиненим агросектором;
- лісові залишки: гілки, кора, тирса, залишки після вирубки. Відзначаються високим вмістом лігніну;
- енергетичні культури: вирощуються спеціально для отримання біомаси. Вони мають високий вихід сухої речовини з гектару, добру адаптованість до різних кліматичних умов;
- промислові відходи: макулатура, картон, залишки харчової, текстильної та паперової промисловості.

Ключові характеристики лігноцелюлозної біомаси, що впливають на ефективність біоконверсії: вологість – зазвичай становить 10–20% у сухій сировині. Надмірна вологість знижує енергоефективність процесу, але може полегшити попередню обробку; зольність – коливається в межах 2–10% і впливає на знос обладнання при термічних чи хімічних обробках; щільність упаковки – важлива для транспортування та зберігання та Коефіцієнт кристалічності целюлози – високий рівень кристалічності знижує доступ

ферментів, тому зменшення кристалічності є однією з цілей попередньої обробки.

Найбільшими викликами для біоконверсії є: структурна складність: лігноцелюлоза є фізично та хімічно захищеною матрицею; нерівномірність складу: різні джерела біомаси можуть сильно відрізнятись за вмістом целюлози, лігніну тощо; інгібітори ферментації: під час попередньої обробки можуть утворюватися інгібітори (фурфурол, HMF, фенольні сполуки), які пригнічують ріст мікроорганізмів.

Для ефективної біоконверсії біомаса повинна бути піддана попередній обробці, що має на меті: деструктуризацію лігніну та геміцелюлози; зниження кристалічності целюлози та більшення поверхні для дії ферментів.

Найпоширеніші методи: кислотна та лужна обробка, парова вибухова деструкція, біологічна деструкція (лігнінолітичні гриби), фізико-хімічні методи (ультразвук, мікрохвильове опромінення) [12].

1.2.1. Основні методи попередньої обробки лігноцелюлозної сировини

Лігноцелюлоза складається з трьох основних компонентів – целюлози, геміцелюлози та лігніну. Целюлоза та геміцелюлоза є джерелами цукрів, що піддаються ферментації, тоді як лігнін – структурний полімер, стійкий до біологічного розкладу, і є головною перешкодою на шляху до ефективної конверсії. Тому попередня обробка – це критично важливий етап.

Основні методи попередньої обробки [13]:

- **Фізичні методи:** подрібнення, мікронізація, екструзія, що зменшують розмір часток і підвищують площу поверхні.
- **Хімічні методи:** використання кислот (H_2SO_4 , HCl) або лугів (NaOH , амоніак), які розчиняють лігнін і частково гідролізують геміцелюлозу.
- **Фізико-хімічні методи:** паро-вибухова обробка, амонійна вибухова деструкція (AFEX), обробка рідким CO_2 , що поєднують дію температури, тиску та хімічних реагентів.
- **Біологічні методи:** застосування лігнінолітичних грибів (наприклад, *Phanerochaete chrysosporium*, *Trametes versicolor*) для часткового розкладу лігніну.

Успішна попередня обробка повинна досягати максимальної деструкції лігніну при мінімальному утворенні інгібіторів ферментації, таких як фурфурол, 5-гідроксиметилфурфурол (HMF), ацетат тощо.

Другий етап біоконверсії – перетворення полімерів (целюлози та геміцелюлози) у мономери (цукри), які можуть бути використані мікроорганізмами. Це досягається шляхом кислотного або ферментативного гідролізу.

Кислотний гідроліз: використовує мінеральні кислоти для гідролізу полісахаридів. Перевагою є швидкість, але недоліками – утворення токсичних побічних продуктів та необхідність корозійностійкого

обладнання. Ферментативний гідроліз: здійснюється за допомогою комплексу ферментів (целюлаз, ксиланаз тощо), які специфічно розщеплюють β -глікозидні зв'язки. Цей метод є більш екологічним і вибіркоvim, але дорогим через вартість ферментів.

Новітні дослідження зосереджені на застосуванні генно-інженерних мікроорганізмів або консорціумів, які можуть самостійно виробляти ферменти *in situ*.

Після гідролізу отримані моноцукри (глюкоза, ксилоза, арабіноза) використовуються для мікробної ферментації (табл.1.4). Основним мікроорганізмом, що продукує бутанол, є *Clostridium acetobutylicum* або інші види *Clostridium* у процесі АВЕ-ферментації (ацетон-бутанол-етанол).

Таблиця 1.4

Адаптовані види клостридій, які активно ферментують лігніноцелюлозні субстрати [14]

Назва субстрату	Джерела вуглеводів	Види клостридій
Яблучна макуха	Фруктоза, глюкоза, сахароза	<i>C. beijerinckii</i>
Топінамбур	Поліфруктоза	<i>C. beijerinckii</i>
Сироватка	Лактоза	<i>C. acetobutylicum</i>
		<i>C. beijerinckii</i>
Низькосортна картопля	Глюкоза, крохмаль	<i>C. beijerinckii</i>
Соева меляса	Декстроza, сахароза	<i>C. beijerinckii</i>
Гідролізати деревини	Глюкоза, манноза, лігноцеллюлоза	<i>C. acetobutylicum</i>
Торф	Глюкоза, ксилоза, лігноцеллюлоза	<i>C. beijerinckii</i>
Стічні води виробництва пальмової олії	Лігноцеллюлоза, масло, глюкоза, ксилоза	<i>C. aurantibutyricum</i>
Органічні побутові відходи	Глюкоза, ксилоза, лігноцеллюлоза	<i>C. acetobutylicum</i>

Ключові аспекти процесу ферментації: субстрати: суміш C_5 і C_6 цукрів з гідролізату; мікроорганізми: стандартизовані або генетично модифіковані

штами *Clostridium*, здатні до ферментації як пентоз, так і гексоз. Процеси ферментації можуть проходити як періодично, так й безперервно та багатостадійно.

Процес ферментації інгібується бутанолом при концентраціях понад 13-20 г/л, що потребує адаптованих або толерантних штамів. Значну увагу приділяють метаболічній інженерії для підвищення продуктивності штамів та їх адаптації до нестерильних умов, а також використанню синтетичної біології.

Після ферментації бутанол знаходиться у бродильній рідині у низькій концентрації, і його потрібно виділити. Стандартна перегонка є енерговитратною, тому розглядаються альтернативні методи [15]:

- Перегонка з парою: традиційний метод, але з високими витратами енергії.
- Пермеація через мембрани: використовується для виділення бутанолу при низьких концентраціях.
- Екстракція рідинна: із застосуванням розчинників, таких як алкіл-ацетати, для селективного вилучення бутанолу.
- Газова стратифікація (газ-стріпінг): видалення бутанолу з рідини за допомогою газів (N_2 , CO_2).
- Первапорація: новітній метод з використанням мембран, що дозволяє розділення на молекулярному рівні.

З метою підвищення ефективності часто застосовують інтегровані підходи: SSCF (Simultaneous Saccharification and Co-Fermentation) – одночасне проведення гідролізу та ферментації, що зменшує інгібування ферментів; CBP (Consolidated Bioprocessing) – використання мікроорганізмів, здатних одночасно гідролізувати полімери і ферментувати цукри; IBP (Integrated Biorefinery Process) – комбінація виробництва бутанолу з отриманням побічних цінних продуктів (біогаз, добрива, білкова маса тощо).

Методи біоконверсії лігноцелюлозної сировини в бутанол постійно вдосконалюються завдяки синергії біотехнологій, хімічного інжинірингу та матеріалознавства. Вибір конкретного підходу залежить від типу сировини, масштабу виробництва та бажаних показників ефективності. Ключовими напрямками розвитку залишаються зниження енерговитрат, підвищення толерантності мікроорганізмів до інгібіторів та інтеграція процесів у єдину систему з максимальним відновленням ресурсів [17].

1.3. Вимоги щодо дотримання оптимальних параметрів процесу біоконверсії лігніноцелюлозних субстратів у бутанол

Процес біоконверсії лігноцелюлозного субстрату в бутанол є багатофакторним і залежить від багатьох параметрів, які можуть істотно впливати як на вихід продукту, так і на ефективність процесу загалом. До ключових параметрів, що підлягають оптимізації, належать: рН середовища, температура, концентрація субстрату, співвідношення поживних компонентів, тип попередньої обробки сировини, а також використання генетично модифікованих штамів-продуцентів. Розглянемо кожен з параметрів детальніше [19].

Температура є критичним фактором, що безпосередньо впливає на активність ферментів, швидкість ферментації та ріст мікроорганізмів. Оптимальна температура для більшості штамів роду *Clostridium*, що використовуються для виробництва бутанолу методом ацетоно-бутанол-етанольної (ABE) ферментації, знаходиться в межах 30–37°C. Підвищення температури вище 40°C призводить до пригнічення метаболічної активності, а нижчі температури уповільнюють ферментативні процеси (рис.1.6).

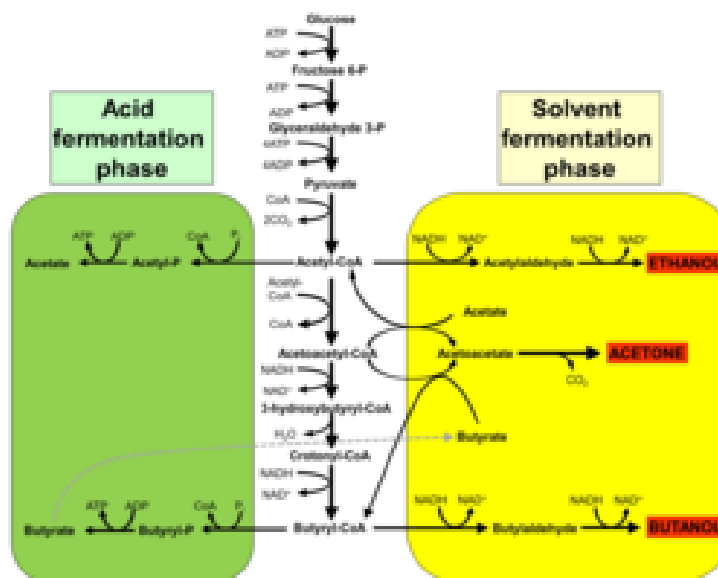


Рис. 1.6. Схема ацетоно-бутанол-етанольної ферментації [18].

Експериментальні дослідження свідчать, що оптимальна температура для більшості процесів біоконверсії лігноцелюлозного субстрату коливається

в межах $35\pm 2^{\circ}\text{C}$, що забезпечує баланс між активністю ферментів гідролізу та стабільністю клітин продуцента.

Оптимальне значення рН для продуктивної ферментації за участі *Clostridium acetobutylicum* та подібних мікроорганізмів зазвичай становить 5.5–6.5. У процесі ферментації рН середовища може знижуватись внаслідок утворення органічних кислот (наприклад, масляної та оцтової), що є типовими проміжними метаболітами.

Надмірне закислення середовища може інгібувати ріст бактерій та спричиняти зниження продуктивності бутанолу. Тому ефективним є використання буферних систем (фосфатних, карбонатних) або періодичне регулювання рН шляхом додавання лугів, таких як NaOH або $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Оптимальний контроль рН значно покращує селективність процесу до бутанолу порівняно з побічними продуктами [20].

Концентрація лігноцелюлозного субстрату безпосередньо впливає на вихід бутанолу, однак її підвищення має обмеження. Високі концентрації призводять до в'язкості середовища, утруднюють масообмін та можуть викликати субстратну інгібіцію. Дослідження показують, що оптимальна концентрація подрібненого лігноцелюлозного матеріалу (у перерахунку на суху речовину) становить 30–60 г/л.

У випадку застосування попередньо гідролізованого субстрату (наприклад, після кислотного або ензимного гідролізу), концентрація цукрів у середовищі має бути в межах 40–60 г/л. За вищих концентрацій можливе виникнення осмотичного стресу в бактеріальних клітинах та зниження активності ферментативних систем.

Попередня обробка лігноцелюлозної біомаси є важливою передумовою ефективного вивільнення цукрів, необхідних для подальшої ферментації. Серед найефективніших методів – кислотний (зазвичай із застосуванням H_2SO_4), лужний (з використанням NaOH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$), паротисковий (steam explosion) та біологічний (ферментативний).

Для підвищення ефективності процесу доцільно комбінувати методи, наприклад: кислотна обробка + ферментативний гідроліз. Це дозволяє руйнувати як геміцелюлозу, так і частково лігнін, покращуючи доступ ферментів до целюлози.

Оскільки біоконверсія бутанолу є анаеробним процесом, суворе дотримання безкисневих умов є обов'язковим. Навіть незначне надходження кисню в систему здатне інгібувати ферментацію або змінювати метаболізм у напрямку утворення етанолу та оцтової кислоти.

Контроль за редокс-потенціалом (Eh) дозволяє підтримувати стабільні умови для метаболізму *Clostridium*. Оптимальне значення Eh коливається в межах -250...-350 мВ.

Особливу увагу слід приділити вибору мікроорганізму-продуцента. Найбільш вивченими є штами *Clostridium acetobutylicum*, *C. beijerinckii*, *C. saccharobutylicum* та їх генетично модифіковані форми. Новітні біотехнології дозволяють розробляти штами з підвищеною толерантністю до інгібіторів, підвищеною стійкістю до бутанолу (до 20 г/л) та здатністю до переробки пентоз [21].

Розглядається також використання ко-культивування (наприклад, з ферментативно активними грибами або бактеріями), що дозволяє підвищити вихід бутанолу за рахунок синергічного ефекту.

Типова тривалість процесу біоконверсії становить 48–72 години, після чого досягається максимальна концентрація бутанолу. Подовження часу ферментації до 96 годин може призвести до автолізу клітин та споживання утвореного продукту.

Оптимізація часу залежить від швидкості споживання субстрату, типу продуцента та концентрації початкових цукрів. Важливим є регулярний моніторинг динаміки ферментації за допомогою хроматографії або спектрофотометрії.

1.4. Екологічні та економічні аспекти виробництва бутанолу із лігноцелюлозної сировини

Однією з головних екологічних переваг виробництва бутанолу з лігноцелюлозної біомаси є зменшення викидів парникових газів. Біобутанол, на відміну від викопного пального, під час згоряння виділяє значно менше CO_2 , і той об'єм, який виділяється, частково компенсується поглинанням вуглецю під час росту біомаси (принцип вуглецевого нейтралітету). Таким чином, загальний баланс викидів може бути практично нульовим або навіть негативним у разі комплексного перероблення відходів [22-24].

Лігноцелюлозна біомаса – це переважно відходи сільського та лісового господарств (солома, тріска, стебла кукурудзи, лушпиння, гілля, тощо), а також міські органічні залишки. Використання цих ресурсів дозволяє уникнути їх неконтрольованого розкладу на полігонах, що є джерелом метану – потужного парникового газу. До того ж, біоконверсія таких залишків зменшує потребу в спалюванні чи захороненні, тим самим зменшуючи навантаження на довкілля.

Перехід на біопаливо третього покоління, таким як бутанол з лігноцелюлозної біомаси, дозволяє знизити залежність від нафти та газу, зменшуючи ризики пов'язані з геополітичною нестабільністю, видобутком та транспортуванням нафтопродуктів, що спричиняють значні екологічні загрози.

Порівняно з вирощуванням енергетичних культур, лігноцелюлозна біомаса не потребує додаткового зрошення, добрив чи пестицидів. Таким чином, процес має значно менше водне навантаження, а ризики забруднення ґрунтових вод залишками хімікатів суттєво знижуються [25].

Бутанол має високу теплоту згоряння (29.2 МДж/л), що робить його енергетично привабливішим за етанол (21.2 МДж/л) та ближчим до бензину (32 МДж/л). Крім того, бутанол не гігроскопічний, не викликає корозії у

паливній системі та може використовуватись без істотних змін у двигунах внутрішнього згоряння, що знижує вартість адаптації інфраструктури.

Лігноцелюозна біомаса – це практично безкоштовна або дуже дешева сировина. Багато підприємств змушені витратити кошти на утилізацію відходів, тоді як у контексті біоконверсії ці відходи перетворюються у цінний ресурс. Це зменшує загальну собівартість виробництва бутанолу [26].

Впровадження установок для біоконверсії біомаси може стимулювати створення нових робочих місць у сільській місцевості – як у сфері збирання й транспортування біомаси, так і на етапах біообробки, бродіння, очищення та дистиляції бутанолу. Таким чином, біоекономіка сприяє децентралізації виробництва енергії та розвитку регіонів.

Сучасні технології біоконверсії, зокрема гідроліз та ABE-ферментація, стрімко вдосконалюються, що знижує витрати на виробництво бутанолу. При достатньому масштабуванні виробництва та підтримці з боку держави (дотації, податкові пільги, субсидії на "зелену" енергію), біобутанол може стати конкурентним навіть на традиційному ринку нафтопродуктів.

Біобутанол може бути частиною комплексної біорефінерії, де окрім палива, виробляються також цінні побічні продукти: біогаз, органічні кислоти, добрива, хімічні реагенти тощо. Така модель дозволяє досягти повного використання біомаси та підвищити економічну рентабельність проекту [27].

Хоча екологічні й економічні вигоди очевидні, існують і певні виклики: технічна складність попередньої обробки лігноцелюлози, яка вимагає енергетичних витрат та застосування ферментів чи кислот; висока вартість ферментів для ефективного гідролізу.

Нестабільність процесу бродіння через інгібуючі речовини, що утворюються при розкладанні лігніну та потреба у спеціалізованих реакторах для утримання анаеробних умов та підтримки температурного режиму.

Однак розвиток інноваційних підходів, зокрема генно-інженерних модифікацій продуцентів, каталітичних систем і біоінтегрованих процесів, дозволяє оптимізувати ці етапи та зменшити витрати.

Отже, виробництво бутанолу з лігноцелюлозної біомаси поєднує суттєві екологічні переваги – зменшення викидів, зниження навантаження на довкілля, утилізацію відходів – з економічними вигодами: дешевизна сировини, енергоефективність продукту та перспективи розвитку локальних економік. Успішне вирішення технологічних викликів зробить цей підхід ключовим елементом стратегії сталого енергетичного переходу.

Важливим аспектом дослідження є комплексне обґрунтування екологічної та економічної доцільності використання лігноцелюлозної біомаси для виробництва біобутанолу. Аналіз життєвого циклу виробництва бутанолу демонструє суттєве зменшення викидів парникових газів, утилізацію відходів аграрного сектору, а також потенціал до заміщення частини нафтових енергоносіїв без необхідності модифікації існуючої інфраструктури (наприклад, для транспорту). У свою чергу, економічна оцінка показує, що при правильному підході до вибору сировини, оптимізації процесу та використанні побічних продуктів (наприклад, лігніну для спалювання або виробництва активованого вугілля), виробництво бутанолу може бути конкурентоспроможним [29].

РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Хімізм біоконверсії лігноцелюлози з метою одержання біопалива – біобутанолу

Розглядаючи лігноцелюлозу як субстрат для біоконверсії, можна констатувати її значну доступність, відновлюваність та відсутність конкуренції з продовольчими ресурсами.

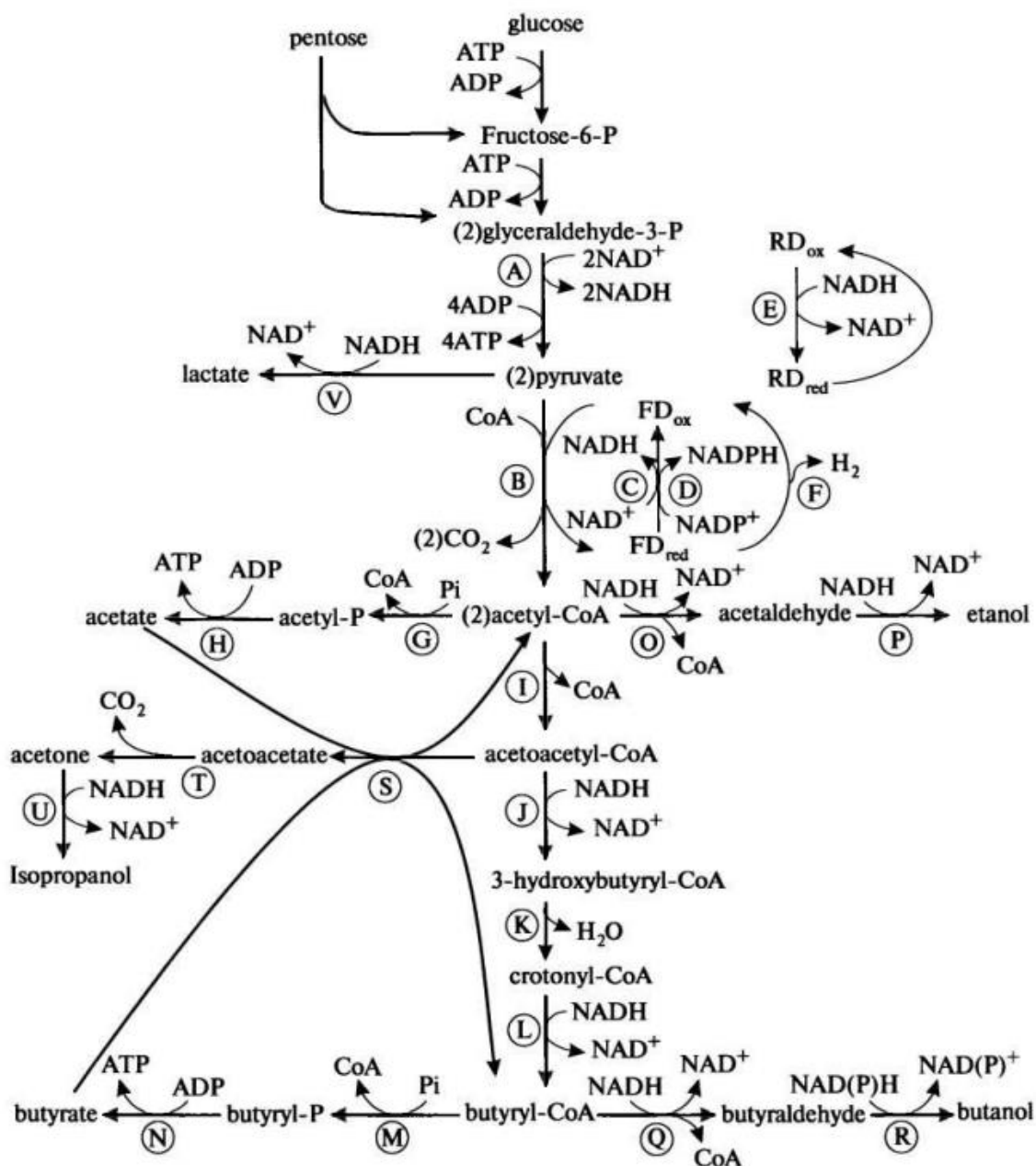


Рис. 2.1. Біохімізм процесу промислової АВЕ-ферментації [30]

Початкові дослідження (Jones & Woods, 1986) з виробництва бутанолу з використанням *Clostridium acetobutylicum* у процесі АВЕ-ферментації (ацетон-бутанол-етанол) заклали фундамент для сучасних біотехнологічних стратегій, які базуються на генетично модифікованих штаммах та удосконалених ферментаційних процесах. Метаболічний процес промислової АВЕ-ферментації наведений на схемі (рис.2.1).

За промислової АВЕ-ферментації як кінцеві цільові продукти утворюється окрім бутанолу також ацетон і етиловий спирт у пропорції 6: 3 :1 відповідно. Даний технологічний процес ферментації розділений на дві технологічні ланки: стадія кислотного синтезу та стадія синтезу спиртів. Перша стадія технологічного процесу плавно переходить у другу стадію за умови нагромадження ацетатної та бутиратної кислот, де відбувається відновлення їх до відповідних спиртів.

У процесі ферментації лігноцелюлозних структур до моноцукридів, зокрема, глюкози, яка далі метаболізується до піровиноградної кислоти за класичною схемою гліколізу (цикл Ембдена-Мейєгофа-Парнаса). Однак, компоненти деструкції лігноцелюлози по-різному гідролізуються ферментами мікроорганізмів.

Повністю піддаються перетворенню (утилізуються): поліцукриди – крохмаль та декстрини; дицукриди – лактоза та цукроза; моноцукриди – глюкоза (рис. 2.2), маноза, фруктоза. Частковій утилізації піддаються маніт та інулін, галактоза та рафіноза, арабіноза та ксилоза, а гліцерол, рамноза та трегалоза майже не піддаються ферментації клостридіями. У процесі АВЕ-ферментації у лабораторних умовах можна домогтися виходу бутанолу та ацетону в межах 14,5-15,5 г/л та 6,3-10,0 г/л відповідно.

Серед основних джерел лігноцелюлозної біомаси слід відзначити сільськогосподарські відходи (солома, кукурудзяні стебла, лушпиння), деревні залишки, лісопромислові та паперові відходи, а також енергетичні культури (міскантус, енергетична верба, тополя) (табл. 2.1).

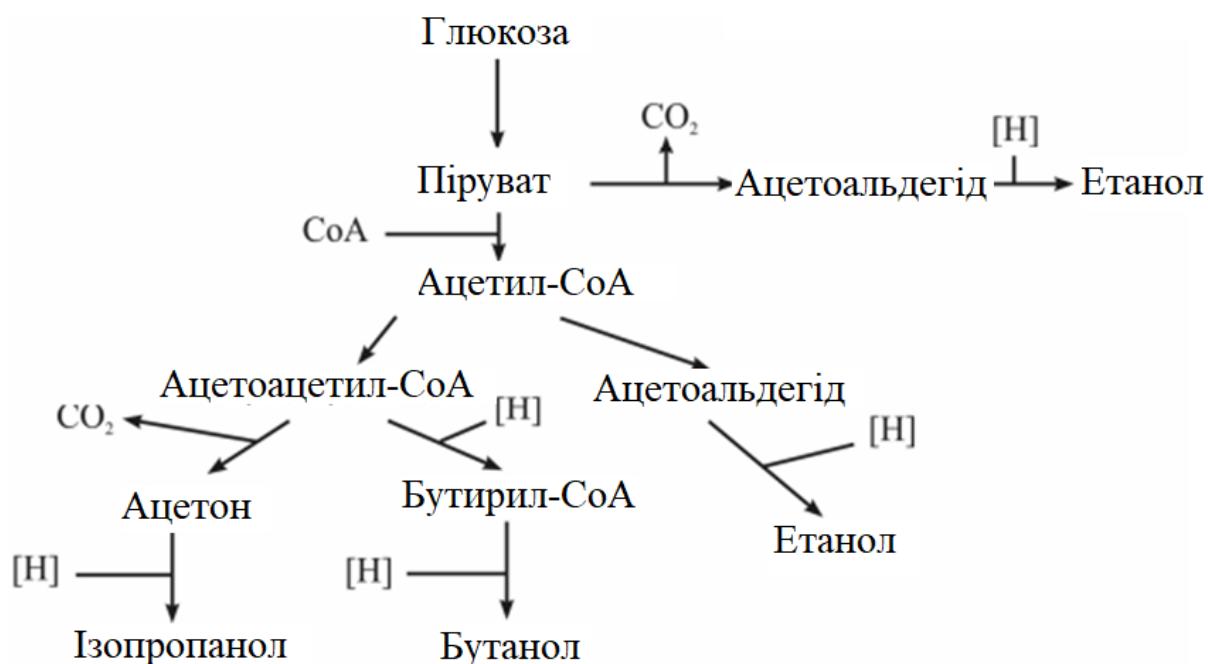


Рис.2.2. Метаболічні шляхи перетворення глюкози [31]

Таблиця 2.1

Склад основних лігноцелюлозних субстратів, які використовуються у технології виробництва біобутанолу (%) [32]

Джерело лігноцелюлозних відходів	Компонент		
	Целюлоза	Геміцелюлоза	Лігнін
Листяні породи дерев	40—55	24—40	18—25
Хвойні породи дерев	45—50	25—35	25—35
Горіхи	25—30	25—30	30—40
Качани кукурудзи	45	35	15
Папір	85—99	0	0—15
Пшенична солома	30	50	15
Рисова солома	32,1	24	18
Відсортоване сміття	60	20	20
Листя	15—20	80—85	0
Волосся насінин бавовни	80—95	5—20	0
Старі газети	40—55	25—40	18—30
Целюлозно-паперові відходи	60—70	10—20	5—10
Свіжий жом	33,4	30	18,9
Відходи свиноферм	6	28	—
Гній від великої рогатої худоби	1,6—4,7	1,4—3,3	2,7—5,7
Просо	45	31,4	12,0
Жито S22 (молоде листя)	21,3	15,8	2,7
Жито S22 (формування насіння)	26,7	25,7	7,3
Садова трава (середньої зрілості)	32	40	4,7
Трави (середнє значення для різнотрав'я)	25—40	25—50	10—30

Однак перетворення лігноцелюлозної біомаси у придатні до ферментації цукри вимагає складної та багатоступеневої обробки – фізичної, хімічної та ферментативної – що зумовлює необхідність пошуку та розробки оптимальних параметрів цього процесу.

2.2. Матеріал і методи

Методологія дослідження є ключовим етапом у процесі вивчення ефективної біоконверсії лігноцелюлозних матеріалів у біобутанол. Вона охоплює весь комплекс методів, прийомів, лабораторних підходів та умов, які були використані для досягнення поставлених цілей: виявлення оптимальних параметрів процесу, підвищення виходу бутанолу, а також забезпечення сталості процесу на основі аналізу основних змінних.

У якості лігноцелюлозної сировини використовувались [34]:

- солома пшениці;
- кукурудзяні стебла;
- лушпиння соняшника;
- тирса деревини (переважно з листяних порід).

Матеріали попередньо висушувались до постійної маси, подрібнювались до фракцій <2 мм та зберігались у герметичних ємностях до використання.

Для руйнування лігніну та покращення доступності целюлози застосовувались різні методи попередньої обробки [33]:

- хімічна (лужна) – з використанням NaOH (1–4%) при температурі 100–120 °C протягом 30–90 хв;
- фізико-хімічна – паротиск (автоклавування 121 °C при 1.5 атм протягом 30 хв);
- ферментативна гідролізація – застосування ферментів целюлази та геміцелюлази при 45 °C, pH 5.0 протягом 48 годин.

Ефективність гідролізу оцінювали за вмістом глюкози та ксилози методом DNS (3,5-динітросаліцилової кислоти).

Для ферментації використовувались бактерії роду *Clostridium*, зокрема: *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824; *Clostridium beijerinckii* BACC 624. Життєвий цикл розвитку клостридій наведений на рис. 2.3.

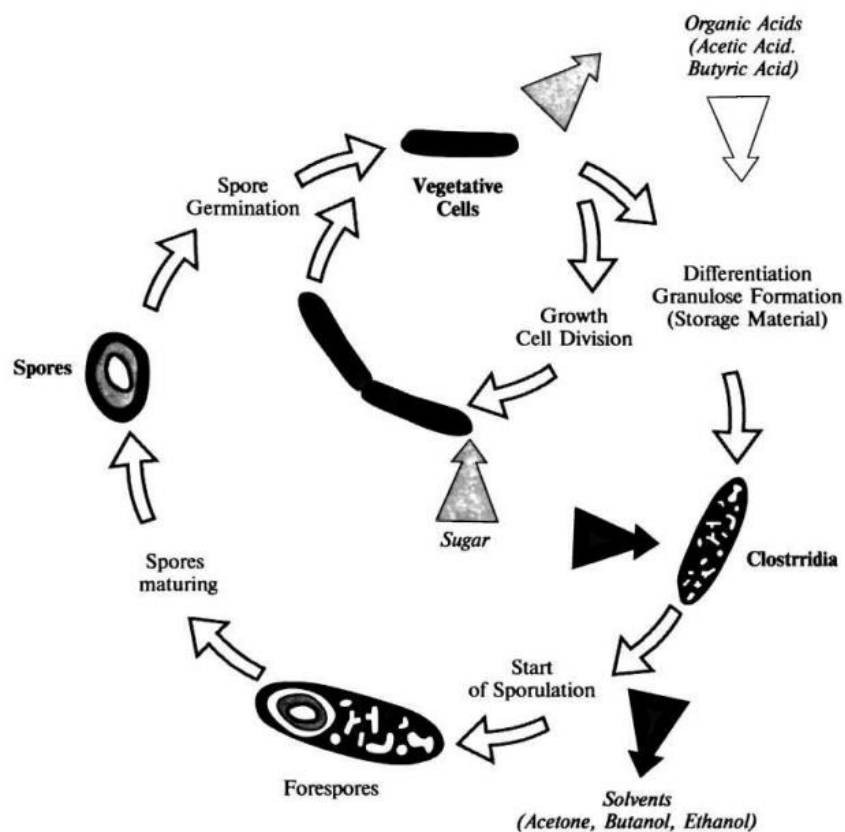


Рис. 2.3. Життєвий цикл розвитку клостридій [35]

Культивування здійснювалось в анаеробних умовах при температурі 37 °C у середовищі P2, модифікованому для лігноцелюлозних гідролізатів. Початкова концентрація клітин становила 10^8 КУО/мл.

Гідролізати вводились до ферментаційного середовища у концентрації 20–60 г/л редукуючих цукрів. Контролювались наступні параметри:

- температура (30-42 °C);
- рН (регулювався у межах 5.5-6.2);
- анаеробність (через азотну або водневу атмосферу);
- час зброджування (48-120 годин).

Відбір проб проводився кожні 12 годин для оцінки динаміки зброджування.

Вміст бутанолу визначали методом хроматографії (GC-FID); цукориди – HPLC з рефрактометричним детектором; вміст лігніну – методом Клаузена; біомаса клітин – спектрофотометрично при 600 нм.

Результати експериментів оброблялись за допомогою програм Statistica та GraphPad Prism. Для визначення оптимальних умов зброджування застосовувались [37].

Для оцінки перспектив масштабування була проведена симуляція процесу у біореакторі з об'ємом 5 л із контролем рН, температури та дозування субстрату. Розроблялись моделі масообміну, кінетики росту та продукції бутанолу з урахуванням інгібуючого впливу побічних продуктів.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Оптимізація структури лігноцелюлозного субстрату та окремих ланок технологічного процесу виробництва біобутанолу

Лігноцелюлозні субстрати, які включають деревину, сільськогосподарські відходи (солома, кукурудзяні качани, лушпиння), а також промислові та муніципальні органічні відходи, є найбільш доступною, економічно вигідною та екологічно прийнятною сировиною для виробництва біобутанолу.

Біоконверсія лігноцелюлозних матеріалів у біопаливо є складним багатоступеневим процесом, що включає попередню підготовку сировини, гідроліз структурних полісахаридів, ферментацію цукрів до бажаного продукту (наприклад, бутанолу) та очищення отриманого біопалива. Вибір оптимального методу залежить від складу сировини, цільового продукту та економічних умов виробництва. Нижче подано найважливіші етапи та підходи до біоконверсії.

У процесі попередньої обробки лігноцелюлозних субстратів можуть утворюватися токсичні речовини – фурфурол, гідроксиметилфурфурол (НМФ), фенольні сполуки, органічні кислоти. Вони є інгібіторами росту мікроорганізмів і знижують продуктивність біоконверсії.

Методи зменшення токсичності включають [38]:

- детоксикацію активованим вугіллям;
- надлишкове розведення гідролізатів;
- використання толерантних штамів;
- розробку більш м'яких методів гідролізу.

Оптимізація параметрів біоконверсії є ключовим аспектом підвищення ефективності виробництва бутанолу з лігноцелюлозної біомаси. Глибоке розуміння фізико-хімічних та біологічних чинників дозволяє створити технологічні умови, за яких процес буде максимально

продуктивним, екологічним та економічно доцільним. Надалі ці параметри слугують основою для масштабування процесу до промислового рівня та впровадження у біоенергетичну інфраструктуру.

На даному етапі, для одержання біобутанолу із використанням як базового субстрату – лігноцелюлозу застосовують різні методи культивування: періодичну (просту періодичну), повторно-періодичну (повторно-періодичну із підживленням), безперервну (ферментації із іммобілізованими культурами; ферментації із збереженням клітин; фізіологічні та кінетичні моделі) та методом із одночасним відновленням продукту (рис. 3.1). На рис. 3.2 наведена принципова технологічна схема виробництва біобутанолу за ферментації лігноцелюлозного субстрату.

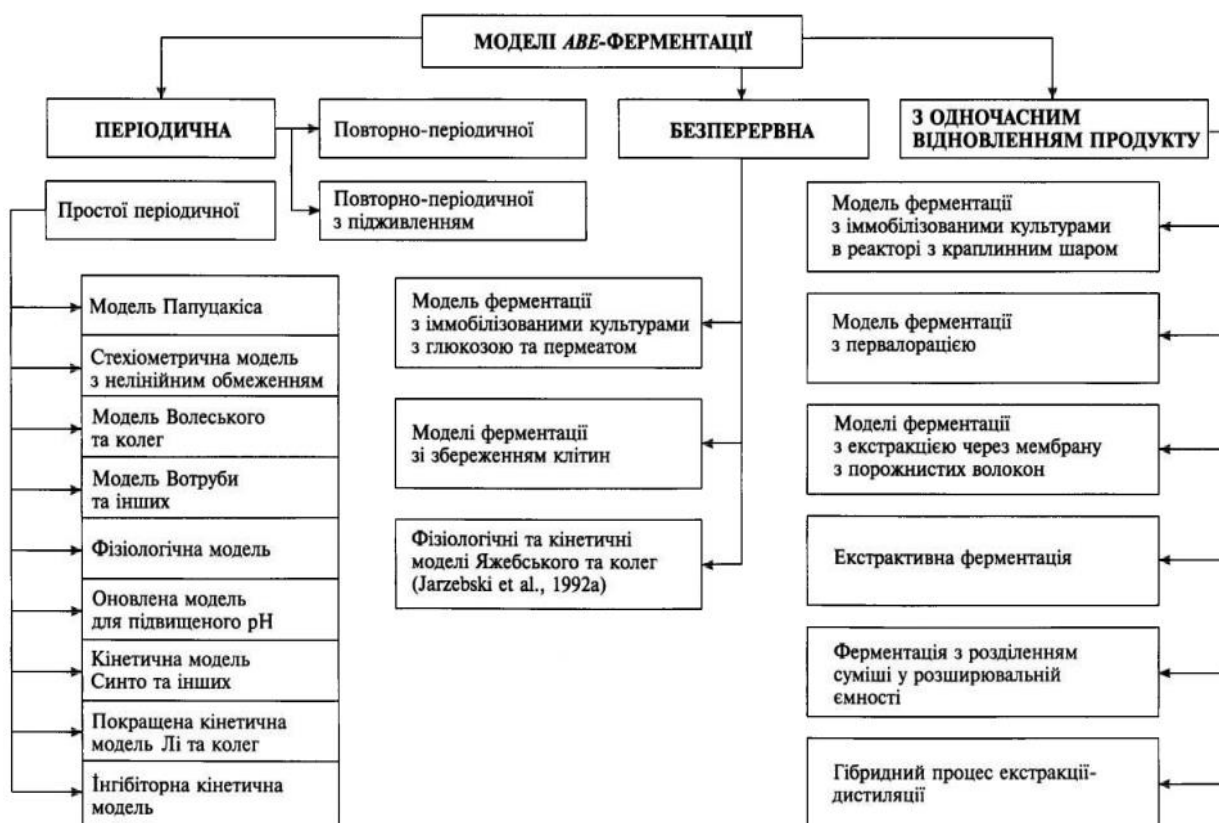


Рис. 3.1. Типи АВЕ-ферментації, які використовуються в промисловому виробництві бутанолу

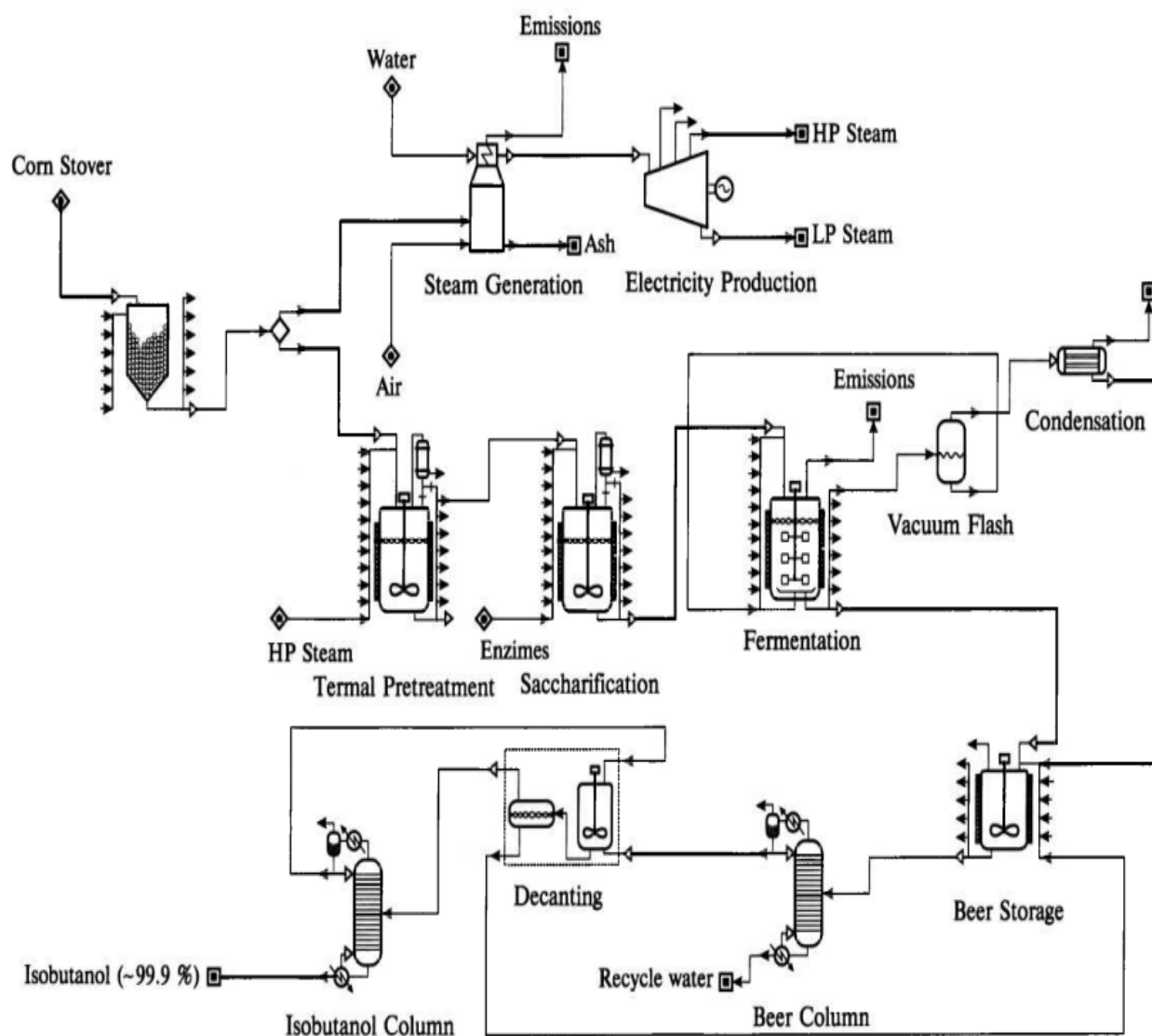


Рис. 3.2. Принципова технологічна схема виробництва біобутанолу за ферментації лігноцелюлозного субстрату

Лігноцелюлозні комплекси представляють собою складну структуру полімерів – целюлози, геміцелюлози та лігніну, які формують жорстку структуру рослинної клітинної стінки. Внаслідок цього біоконверсія лігноцелюлозної біомаси у спиртові біопалива потребує проведення складних фізико-хімічних і біотехнологічних процесів з попередньої обробки субстрату, гідролізу складних полімерів і подальшої ферментації мономерних цукрів.

Саме тому, на початкових етапах експериментальної роботи, ми досліджували вплив ступені подрібнення лігноцелюлозного субстрату (соломи пшеничної рис. 3.3) та обробку його 1,0% сульфатною кислотою на динаміку утворення бутанолу за ацетон-бутанол-етаноловому ферментного процесу.

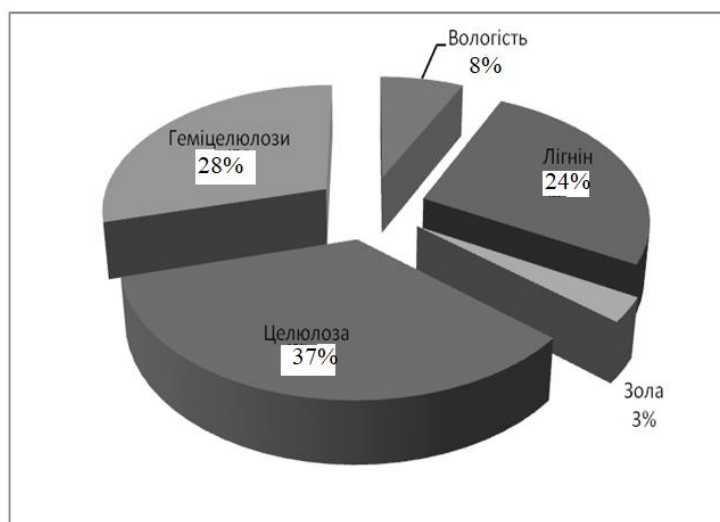
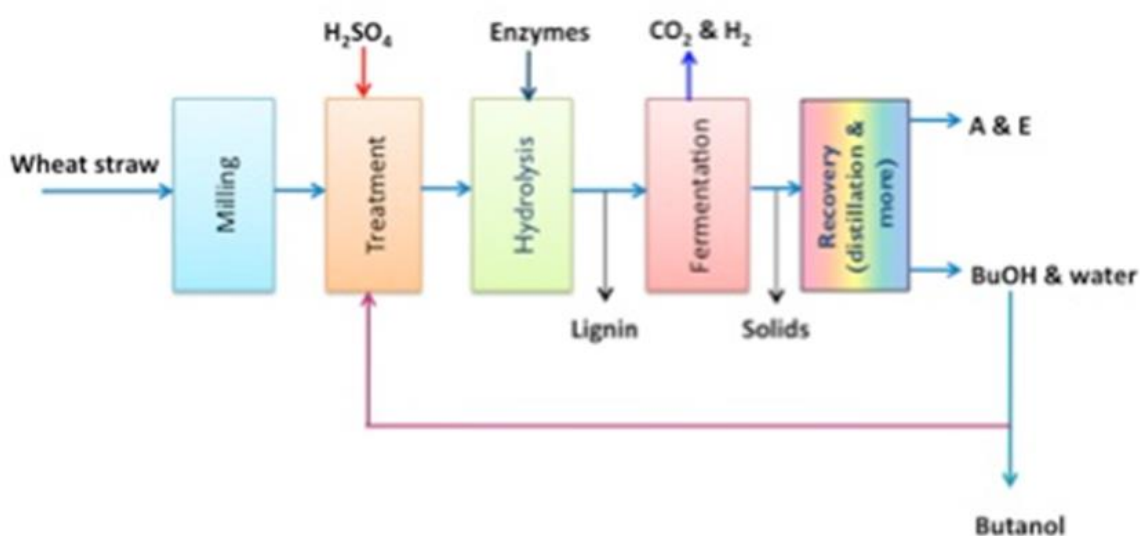


Рис. 3.3. Структурний склад соломи пшеничної (%)

Кислотний гідроліз, згідно методики, здійснювали сульфатною кислотою в концентрації 1% за температури $120 \pm 2,0^\circ\text{C}$ упродовж 30 хв за схемою рис.3.4.



3.4. Схема кислотного гідролізу базового субстрату

Однак, перед кислотним гідролізом лігноцелюлозного субстрату, ми проводили дослідження щодо впливу подрібнення субстрату – пшеничної соломи на синтез цільового продукту – бутанолу за АВЕ-ферментації за використанням продуценту *Clostridium beijerinckii* ВАСС 624 (рис. 3.5).

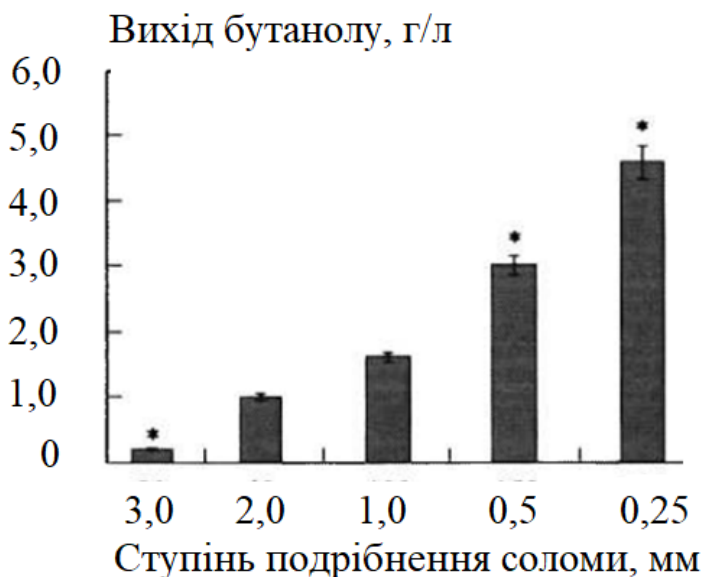


Рис. 3.5. Динаміка синтезу бутанолу залежно від подрібнення базового субстрату (соломи пшеничної)

Як можна спостерігати на рис.3.5, динаміка синтезу бутанолу залежно від розміру побрібнення соломи пшеничної як базового лігноцелюлозного субстрату має прямопропорційну залежність, чим більше подрібнений субстрат, тим більше зростає синтез бутанолу. Враховуючи наші технологічні можливості щодо неможливості подрібнення субстрату до розмірів менше, ніж 0,25 мм, то ми припускаємо, що така залежність буде актуальною також до подальшого зменшення розмірів субстрату для ферментації.

Зменшення розміру частинок лігноцелюлозного субстрату у 12 разів з 3,0 мм до 0,25 мм забезпечило зростання синтезу бутанолу популяцією *Clostridium beijerinckii* ВАСС 624 за ацетон-бутанол-етанолового ферментного процесу в 16 разів із 0,3 до 4,8 г/л.

Важливе значення для активації ферментного процесу одержання біобутанолу в процесі культивування лігноцелюлозної сировини має деградації (руйнування) целюлозно-лігнінових структур за допомогою кислотного гідролізу 1% сульфатною кислотою різними популяціями клостридій (рис.3.6).

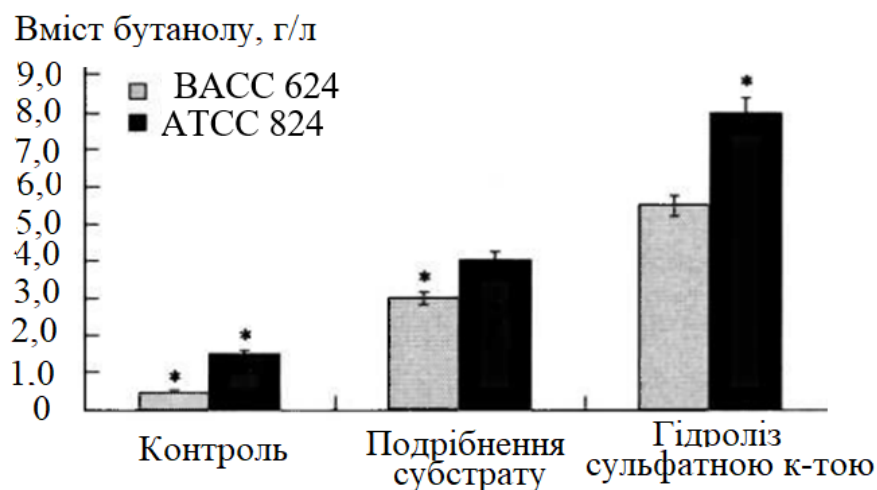


Рис.3.6. Культивування подрібненого та гідролізованого лігноцелюлозного субстрату штамами ATCC 824 та BACC 624 за АВЕ-ферментації

Як видно із рис 3.6, популяції *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824 більш адаптовані до базового субстрату – соломи пшеничної порівняно із популяціями *Clostridium beijerinckii* BACC 624 на це вказує вміст бутанолу в культуральному середовищі. В усереднених зразках приріст біобутанолу за використанням продуценту *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824 в процесі подрібнення субстрату до 0,25 мм та гідролізом його 1% сульфатною кислотою порівняно із *Clostridium beijerinckii* BACC 624 був вищим на 25,7%.

Гідроліз клітинних оболонок соломи пшеничної 1% розчином сульфатної кислоти впродовж 30 хв сприяв збільшенню у 5,3 рази вміст бутанолу (8,0 г/л) порівняно до контролю (1,5 г/л). Очевидно, це пов'язано із частковою деградацією компонентів лігноцелюлозного субстрату – соломи пшеничної (табл.3.1).

Таблиця 3.1

Структурний склад лігноцелюлозного субстрату – соломи пшеничної до та після обробки 1% розчином сульфатної кислоти впродовж 30 хв

Компоненти, %	Котроль (до гідролізу, %)	Після гідролізу, %
Целюлоза	37,4	45,6
Лігнін	24,2	24,6
Геміцелюлоза	27,2	12,9
Редукуючі речовини	5,2	10,4
Попіл	4,8	4,8
Інші	1,2	1,7
Разом	100	100

Як видно із табл. 3.1, кислотний гідроліз базового субстрату 1% розчином сульфатної кислоти сприяє гідролізу, в основному, геміцелюлози, вміст якої зменшився на 14,3% порівняно до контролю із одночасним зростанням на 5,2% кількості редукуючи речовин (легкозброджуваних вуглеводів). Поряд із цим, зросла кількість целюлози на 8,2%, лігнінові компоненти залишились на одному рівні.

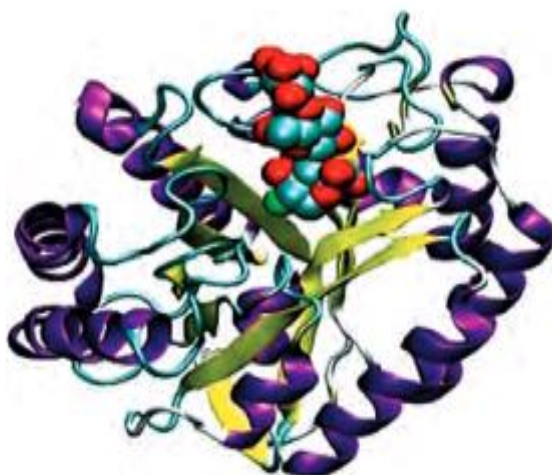


Рис.3.7. Модель просторового контакту ферментних систем клостридій із лігноцелюлозним субстратом

Отже, застосування кислотного гідролізу (1% H_2SO_4 при температурі 120°C упродовж 30 хв) дозволило досягти значного підвищення виходу цільового продукту за рахунок активного включення редукуючих цукрів зі структури геміцелюлози в метаболічні процеси, вони забезпечили більш тіснішу взаємодію між ферментами клостридій та структурними компонентами базового субстрату (рис.3.7).

Методи, вищезгаданої попередньої обробки, показали значну ефективність використання базового субстрату, зберігаючи при цьому екологічну безпечність і були менш агресивними до клітинної стінки мікроорганізмів-продуцентів.

Із наведених результатів експериментальних досліджень, рис.3.8 видно, що, додаткова термічна обробка побрібної соломи як лігноцелюлозного субстрату гострою водяною парою сприяє збільшенню утворенню бутилового спирту на 14,3% порівняно із субстратом, який не піддавався термічній обробці в процесі АВЕ-ферментації.

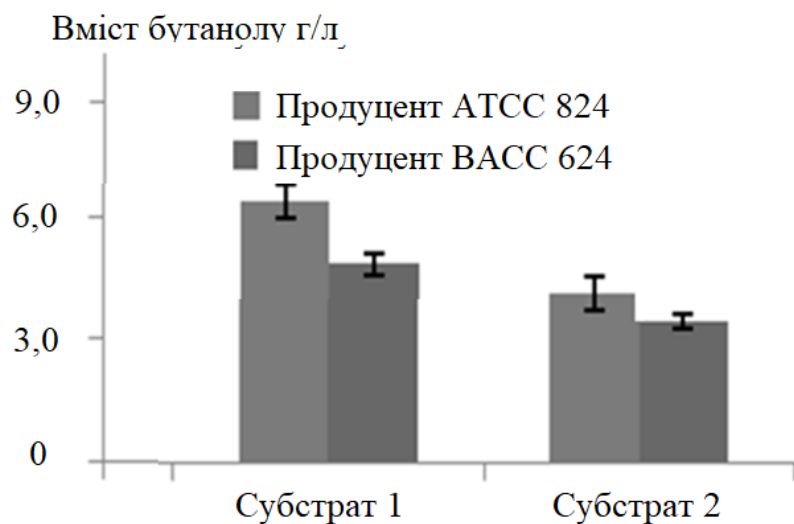


Рис. 3.8. Вплив термічної обробки на вихід бутанолу з лігноцелюлози за участю продуцентів ATCC 824 та BACC 624: субстрат 1 (побрібнена солома + обробка гострою парою), субстрат 2 (подрібнена солома).

Очевидно, термічна обробка базового субстрату забезпечує часткове руйнування лігноцелюлозного комплексу, із утворенням редукуючих вуглеводних сполук, які безпосередньо метаболізувалися в біобутанол.

Важливим, а також його можна вважати критичним фактором, який забезпечує активність ферментації та ріст і розмноження популяції продуцента є оптимізація температурного режиму культивування. Зростанням температури культивування із 32 до 36°C сприяло, майже лінійному, підвищенню концентрації бутилового спирту культуральному середовищі ферментованих обидвома штамами клостридій.

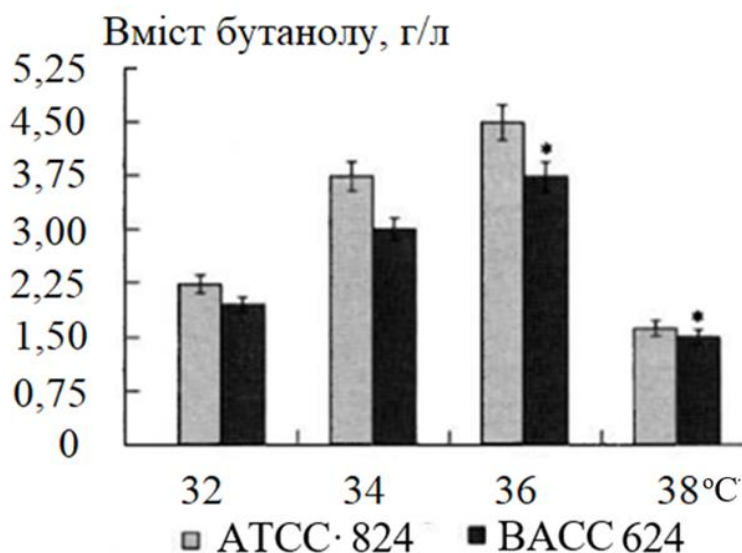


Рис. 3.9. Динаміка утворення бутилового спирту залежно від температурного режиму культивування

Так, приріст бутилового спирту, із підвищенням температури культивування зростає із 2,25 г/л бутанолу за температури 32°C до 3,75 г/л – за температури 34°C та 4,5 г/л – за температури 36°C (для *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824) і відповідно 2,10 г/л бутанолу за температури 32°C до 3,00 г/л – за температури 34°C та 3,8 г/л – за температури 36°C (для *Clostridium beijerinckii* BACC 624). А за температури поживного середовища культивування 38°C активність біосинтезу бутанолу різко знижується.

Отже, оптимальна температура для вибраних штамів роду *Clostridium*, які використовуються для виробництва бутанолу методом ацетоно-бутанол-етанольної (АВЕ) ферментації, є температура 36°C.

З огляду літератури відомо [39], що важливе значення для активного біосинтезу біобутанолу популяціями клостридій є джерела Карбону в поживному середовищі для культивування лігноцелюлозного субстрату.

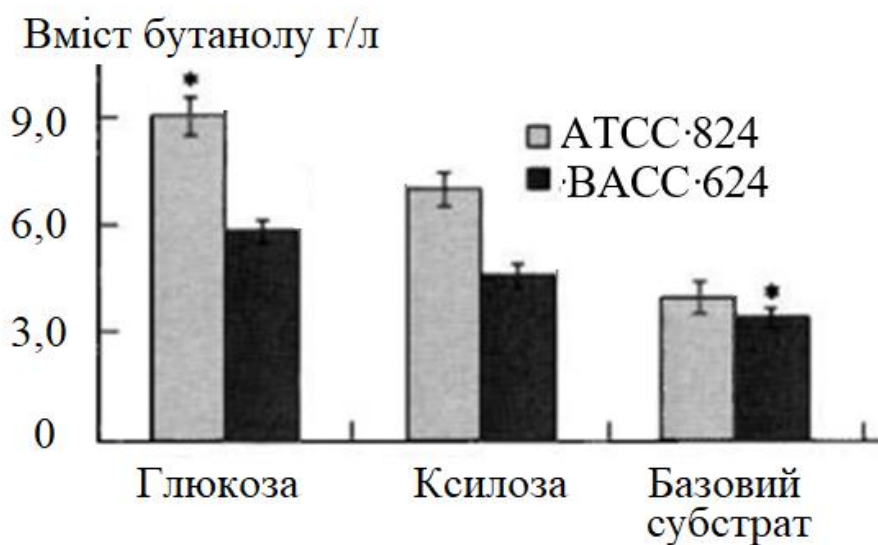


Рис.3.10. Динаміка біосинтезу бутилового спирту залежно від джерел Карбону штамми клостридій

Таблиця 3.2

Динаміка вмісту ацетону: бутилового спирту: етилового спирту в культуральному середовищі залежно від джерел Карбону, г/л

Штам продуцент	Субстрат		
	Глюкоза	Ксилоза	Базовий
АТСС 824	6,4 : 9,6 : 1,5	0,4 : 7,1 : 0,5	0,2 : 3,6 : 0,1
ВАСС 624	2,3 : 5,8 : 5,1	1,2 : 4,5 : 2,7	1,4 : 3,4 : 4,2

Із наведеного рис. 3.10, видно, що найкращим джерелом Карбону для ацетоно-бутанол-етанольної ферментації є глюкоза як базовий субстрат.

Використання даного субстрату забезпечує зростання концентрації біобутанолу в культуральному середовищі у 1,84 рази для штаму ATCC 824 порівняно до вмісту бутанолу за використанням базового субстрату. За використанням ксилолу також спостерігався приріст бутанолу, однак його концентрація була у 1,38 рази вищою за використанням базового субстрату.

Окрім бутанолу, у бродильному середовищі було зафіксовано присутність ацетону (0,2-1,4 г/л) та етанолу (0,1-4,2 г/л), що узгоджується з класичним АВЕ-процесом. Співвідношення ацетон:бутанол:етанол у найкращих зразках складало 1:6:0,5, що є прийнятним для подальшої промислової переробки та розділення фракцій.

Проаналізувавши співвідношення кінцевих продуктів культивування (ацетон: бутанол: етанол) (табл. 3.2), ми прийшли до висновку, що використання моноцукридів глюкози та ксилози є найбільш бажаними джерелами Карбону, бо за їх використанні спостерігається найвищий приріст бутанолу відповідно 9,6 та 7,1 г/л, що у 2,68 та 1,92 рази перевищували базовий лігноцелюлозний субстрат.

Однак, враховуючи економічну доцільність та вартість зазначених субстратів необхідно продовжувати пошук нових підходів щодо оптимізації окремих ланок технологічного процесу виробництва бутанолу на основі дешевих лігноцелюлозних субстратів.

Важливо, також, проводити постійний контроль рН поживного середовища в процесі ферментації, оскільки дотримання сталого рН у культуральному середовищі забезпечує селективність до цільового продукту – бутанолу порівняно із побічними продуктами: ацетоном та етиловим спиртом [36].

За умов лабораторних досліджень, нами, було встановлено оптимальне значення рН культурального середовища на рівні 6,5. За такого рН, приріст бутилового спирту при культивуванні штамами клостридій був найвищим і складав для штаму ATCC 824 6,5 г/л, що перевищувало дослідні

зразки на 18,5-21,6%, а для штаму ВАСС 624 5,2 г/л, що перевищувало дослідні зразки на 7,7-17,4%.

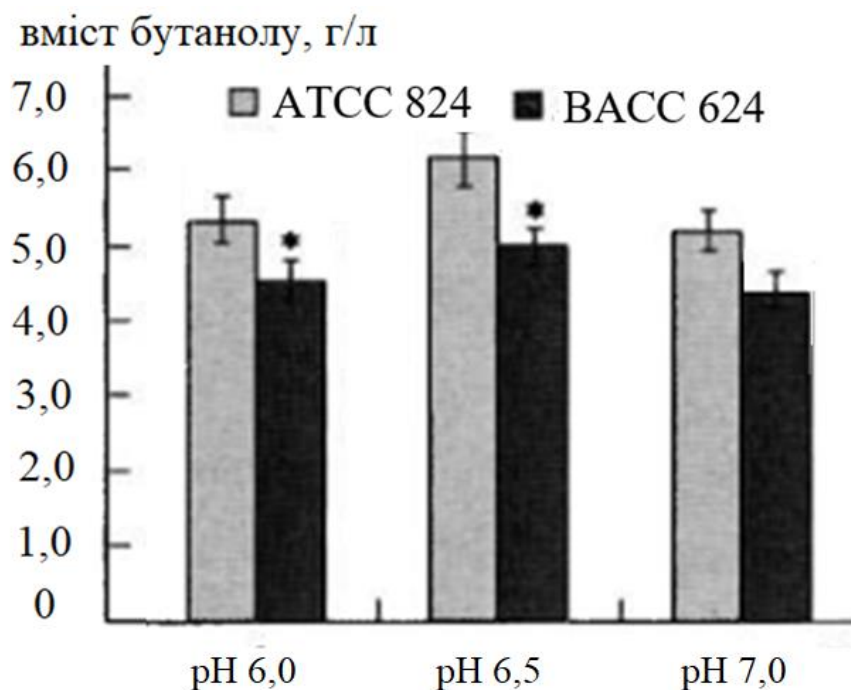


Рис. 3.11. Динаміка приросту бутанолу залежно від рН культурального середовища

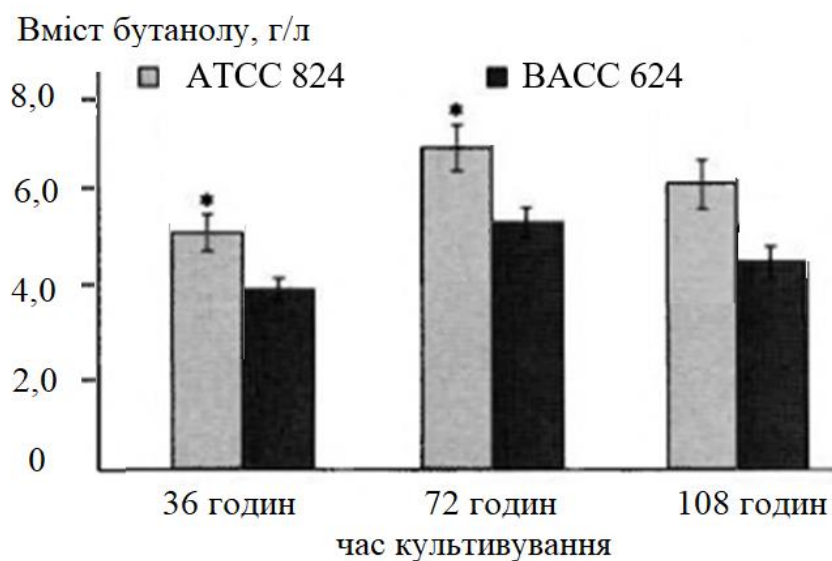


Рис. 3.12. Утворення біобутанолу залежно від часу культивування продуценту клостридій

Технологічний процес виробництва довільного цільового продукту, в тому числі й бутанолу, має бути економічно обґрунтованим та доцільним. Саме тому, тривалість культивування лігноцелюлозного субстрату для досягнення максимального біосинтезу бутанолу є одним із елементів економічної доцільності.

Збільшення часового режиму ферментації може супроводжуватися інгібуванням ферментних систем біосинтезу цільового продукту, а також можливістю використання цільового продукту продуцентами. Як видно із наведеного вище рисунку, оптимальним часом культивування, за умов наших досліджень, було культивування впродовж 72 годин.

За зазначений час ферментації штамом клостридій ATCC 824 синтезовано 7,2 г/л бутанолу, що на 29,2% більше порівняно із часом ферментації 36 годин (5,1 г/л), та на 12,5% більше порівняно із часом ферментації 108 годин (6,3 г/л). Аналогічні показники динаміки щодо біосинтезу бутанолу нами спостерігалися також за використанням клостридій штаму ВАСС 624

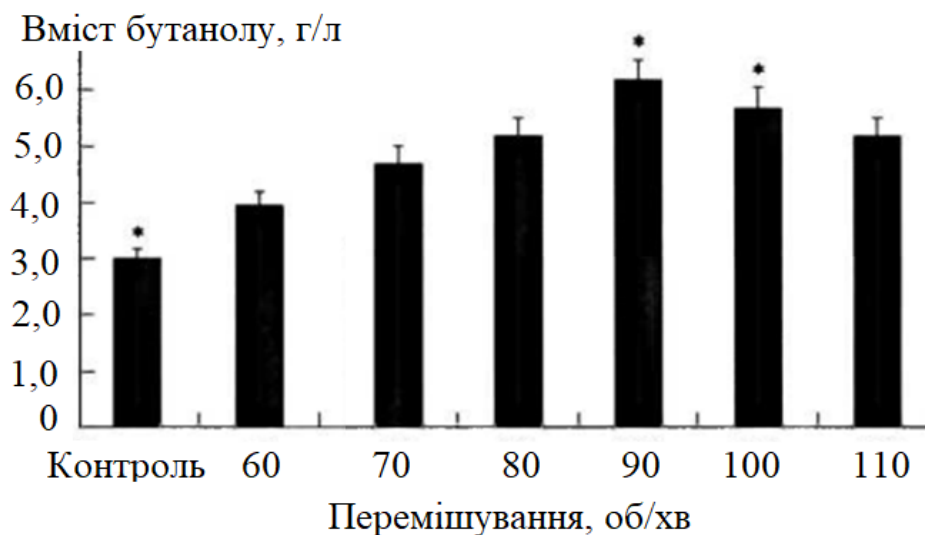


Рис. 3,13. Вплив перемішування субстрату на вихід цільового продукту – бутанолу

Визначення оптимального часу культивування у значній мірі залежить від частоти перемішування субстрату у ферментері, що забезпечить активний контакт між лігноцелюлозним компонентом та ферментними системами продуцента. За умов експерименту (рис.3.13), найбільш оптимальне перемішування лігноцелюлозного субстрату було на рівні 90 обертів за хвилину. Така швидкість обертання мішалки (перемішування лігноцелюлозного субстрату) в анаеробних умовах ферментера забезпечила максимальний приріст бутанолу (6,2 г/л) у культуральному середовищі ацетоно-бутанол-етанольної ферментації.

Із експериментальних досліджень, які висвітлено у літературних джерелах [40] відомо, що нормування поживного середовища за мікроелементами, зокрема солями Купруму, сприятливо впливає на синтез бутанолу популяціями клостридій за культивуванні останніх на лігноцелюлозному субстраті.

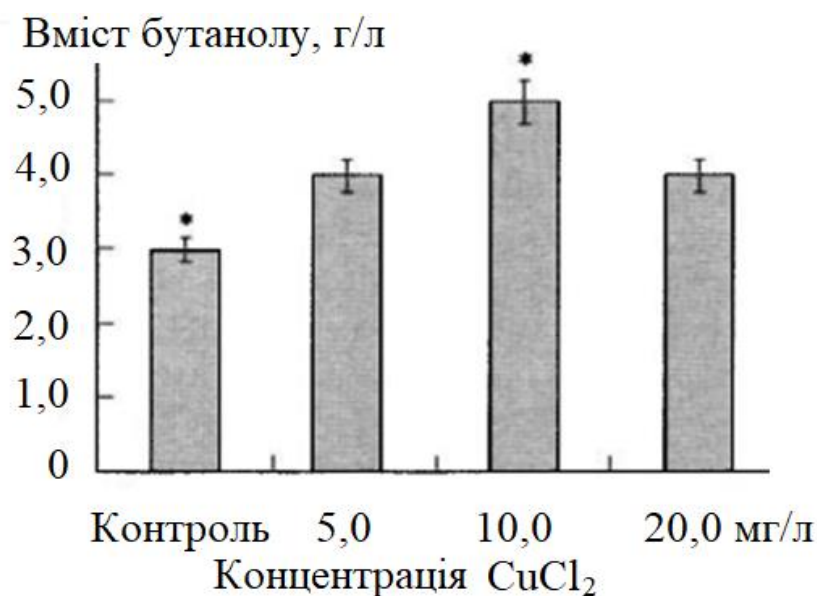


Рис. 3.14. Динаміка синтезу бутанолу залежно від вмісту Купрум хлориду у поживному середовищі

Оптимізація поживного середовища хлоридом купруму в концентрації 10,0 мг/л для культивування лігноцелюлозного субстрату популяціями клостридій забезпечило зростання вмісту біобутанолу на 42,3% порівняно до контролю.

Результати досліджень підтверджують ефективність розробленої технологічної схеми біоконверсії лігноцелюлозного субстрату в бутанол. Досягнутий рівень продуктивності, стабільність біосинтезу та оптимальні параметри процесу свідчать про високий потенціал масштабування розробленої методики для потреб альтернативної енергетики. Однак необхідним є подальше вдосконалення методів очищення гідролізатів, утилізації побічних речовин та автоматизації процесу ферментації.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Опрацьовано літературні джерела та досліджено перспективність використання лігноцелюлозної біомаси у виробництві біобутанолу шляхом удосконалення технології ацетоно-бутанол-етанольної ферментації з використанням дешевих субстратів.

2. Порівняно із цукровмісною лігноцелюлозний субстрат показав вищу загальну енергетичну цінність, що свідчить про доцільність його застосування при наявності ефективної логістики та стратегії поводження з відходами гідролізу.

3. Попри певні переваги технологія ацетоно-бутанол-етанольної ферментації стикається з рядом проблем – від високої вартості обробки сировини до потреби в генетично модифікованих мікроорганізмах із покращеною толерантністю до бутанолу та інгібіторів.

4. У результаті скринінгу бактерій було встановлено, що штами *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824 та *Clostridium beijerinckii* BACC 624 демонстрували найвищу продуктивність щодо синтезу бутанолу за АВЕ-ферментації.

5. У процесі використання при використанні гідролізату лігноцелюлозного субстрату побрібненого до розміру 0,25 мм як основного джерела Карбону середній вихід бутанолу становив 8,0-9,6 г/л. При цьому найвищу продуктивність штамів продуцентів бутанолу було досягнуто за температури 36°C та рН 6.5.

Оптимальним часом ферментації було культивування впродовж 72 годин та перемішуванням лігноцелюлозного субстрату в анаеробних умовах на рівні 90 об/хв із внесенням у поживне середовище хлоридом купруму в концентрації 10,0 мг/л, яке забезпечило зростання на 42,3% вмісту біобутанолу порівняно до контролю, що підтверджує оптимальні умови з точки зору біосинтетичної активності ферментів ацетобутанольного циклу.

6. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на масштабування процесу, вдосконалення мікробних продуцентів та розробку економічних моделей впровадження таких технологій у національні енергетичні стратегії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бессараб, І. М. Технологія виробництва біопалив: навч. посіб. Львів: ЛНТУ, 2020. 224 с.
2. Яремчук, В. О. Біотехнологія альтернативних палив. Київ: НаУКМА, 2021. 198 с.
3. Гринюк, А. В. Лігноцелюлоза: джерела, структура, переробка. Харків: ХНТУ, 2019. 160 с.
4. Андрушак, О. О. Перспективи використання целюлозовмісної біомаси для виробництва біобутанолу // Наукові записки Університету «Острозька академія». Серія: Економіка. 2020. Вип. 18. С. 112–116.
5. Сігал, І. М., Мельник, Л. Г. Виробництво біопалив з відходів: енергетичний і екологічний аспект // Проблеми загальної енергетики. 2019. №2. С. 55–63.
6. Шульга С.М., Тігунова О.О, Блюм Я.Б. Лігноцелюлоза як альтернативна сировина для одержання біобутанолу // *Biotechnologia Acta*. – 2013. V. 6, N 2. С. 9–21.
7. Шульга С.М., Тігунова О.О. Нові штами-продуценти біобутанолу. І. Виділення та ідентифікація // *Biotechnologia Acta*. 2013. V. 6, N 1. С. 97–104.
8. Lee, S. Y., Park, J. H., Jang, S. H. et al. Fermentative butanol production by *Clostridia*. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008. 101(2): 209–228.
9. Qureshi, N., Ezeji, T. C. Butanol, ‘a superior biofuel’ production from agricultural residues (renewable biomass): recent progress in technology. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2008. 2(4): 319–330.
10. Ragauskas, A. J., Williams, C. K., et al. The path forward for biofuels and biomaterials. *Science*, 2006. 311(5760): 484–489.

11. Шульга С.М., Тігунова О.О. Нові штами-продуценти біобутанола. II. Ферментація лігноцелюлозної сировини // *Biotechnologia Acta*. 2014. V. 7, N 4. С. 54–60.
12. Дубровський, В. О. Біотехнологія виробництва бутанолу з лігноцелюлозної біомаси. Вінниця: ВНАУ, 2021. 122 с.
13. Литвиненко, М. І. Біоетанол та біобутанол: технології виробництва. Київ: НТУУ КПІ, 2022. 170 с.
14. Бондаренко, Ю. В. Сучасні напрями переробки лігноцелюлозної сировини. Житомир: ЖНАЕУ, 2018. 132 с.
15. Попов Д.В. До використання біобутанолу в якості моторного палива / Д.В. Попов // *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*. 2010. №3. С. 87-90.
16. Мазепа Ю.В. Екологічні способи перероблення вологого осаду стічних вод целюлозно- паперового виробництва / Мазепа Ю.В., Семінський О.О., Рябцев Г.Л. // *Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження* : зб. наук. праць. 2010. – № 2(6). С. 72-75.
17. Zhang, Y., Geng, A., Yao, C. Butanol production from lignocellulosic biomass: current advances and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2022. 106(4): 1573–1586.
18. Kumar, M., Gayen, K. Developments in biobutanol production: New insights. *Applied Energy*, 2011. 88(6): 1999–2012.
19. Тігунова О. О. Нові штами-продуценти бутанолу. III. Способи підвищення накопичення бутанолу з біомаси дрогоподібного проса *Panicum virgatum* L. / Тігунова О. О., Шульга С. М. // *Biotechnol. Acta*. 2015. Т.8, №4. – С. 65-68.
20. Шевченко, О. Л. Потенціал біоконверсії агровідходів у біопаливо // *Вісник аграрної науки*. 2020. №6. С. 45–49.
21. Хом'як, Л. А. Енергія з біомаси: технологічні основи. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. 184 с.

22. Гнатенко, С. І. Біопаливо з лігноцелюлози: реалії і перспективи. Суми: СНАУ, 2020. 156 с.
23. Тігунова О.О. Підвищення виходу бутанолу мутантного штаму *C. acetobutylicum* на нехарчовій сировині. / Тігунова О. О., Шульга С. М. // Матеріали міжнародної наукової конференції «Біологічні ресурси і новітні біотехнології виробництва біопалива». Київ, 2014. С. 142-148.
24. Руденко, В. А. Альтернативні джерела енергії. Київ: Либідь, 2019. 210 с.
25. Куліш, М. А. Ферментація целюлози: біохімічні аспекти. Одеса: ОНУ, 2021. 98 с.
26. Тігунова О. О. Використання мутантним штамом *C. acetobutylicum* лігноцелюлозної сировини як субстрата / Тігунова О. О., Шульга С. М. // Мікробіологія та біотехнологія. 2015. №3. С. 35-44
27. Dürre, P. Fermentative butanol production. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008. 1125: 353–362.
28. Ren, H. Y., Liu, B. F., et al. Enhanced butanol production using a two-stage fermentation strategy with *Clostridium acetobutylicum*. *Bioresource Technology*, 2018. 256: 294–301.
29. Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., Stroeve, P. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009. 48(8): 3713–3729.
30. Коломієць, Л. П. Біопаливна стратегія України: потенціал і виклики. Дніпро: НГУ, 2019. 145 с.
31. Панасюк, М. В. Екологічна оцінка виробництва біопалива з агровідходів // Екологічна безпека. 2022. №1. С. 21–27.
32. Mabee, W. E., Saddler, J. N. Biomass for biofuels: opportunities and constraints. *Forestry Chronicle*, 2010. 86(3): 354–364.

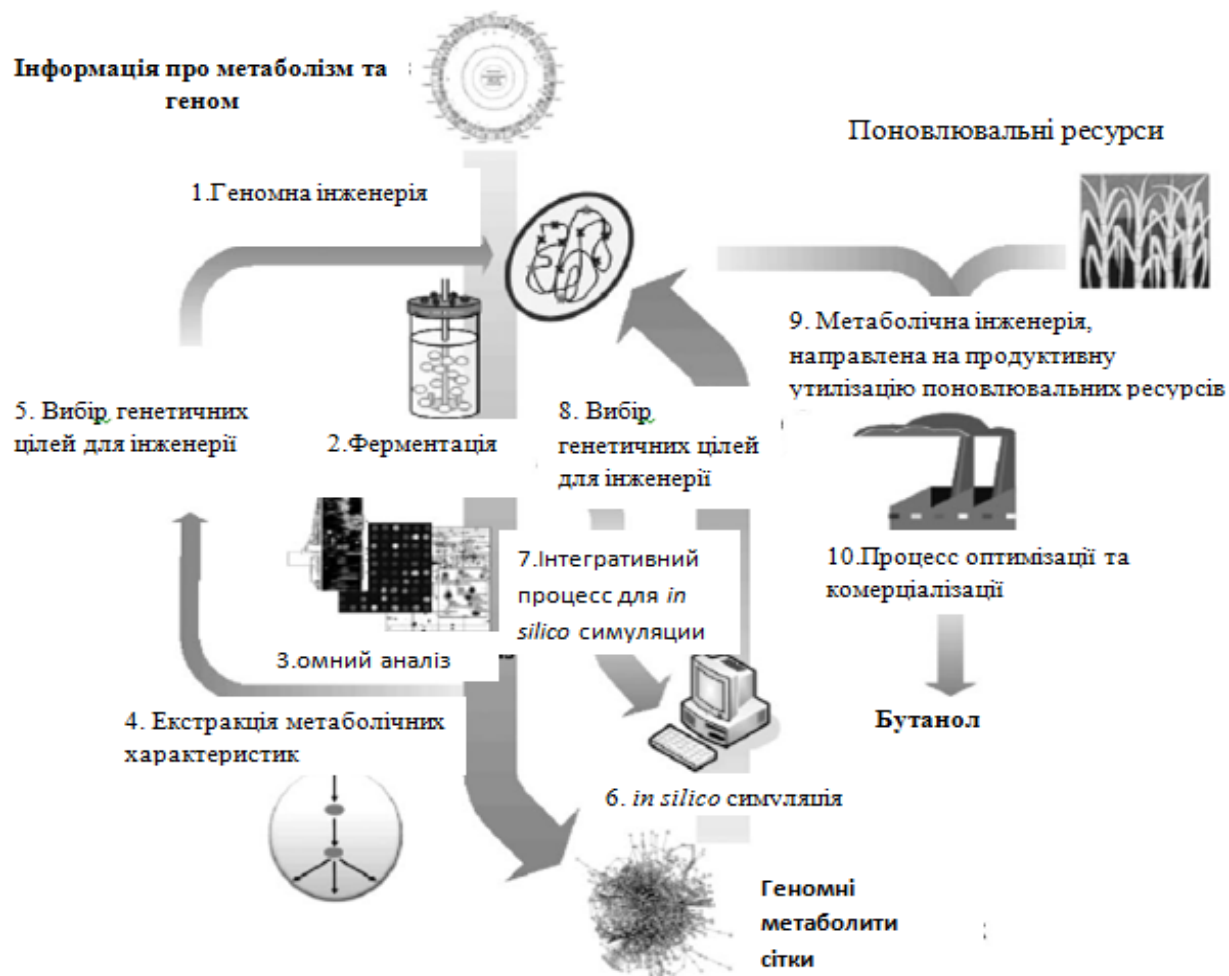
33. Ghosh, D., Chattopadhyay, P., et al. Bioconversion of lignocellulosic biomass to bioethanol: a review. *Biotechnology Reports*, 2019. 24: e00327.
34. Taherzadeh, M. J., Karimi, K. Acid-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: a review. *BioResources*, 2007. 2(3): 472–499.
35. Jones, D. T., Woods, D. R. Acetone-butanol fermentation revisited. *Microbiological Reviews*, 1986. 50(4): 484–524.
36. Lynd, L. R., Weimer, P. J., van Zyl, W. H., Pretorius, I. S. Microbial cellulose utilization: Fundamentals and biotechnology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2002. 66(3): 506–577.
37. Ezeji, T. C., Qureshi, N., Blaschek, H. P. Acetone-butanol-ethanol (ABE) production from concentrated substrate: new insights and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007. 74(5): 869–879.
38. Balat, M. Production of bio-butanol from biomass. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2011. 33(7): 599–610.
39. Wijaya Ch. J., Ismadji S., Gunawan S. Review A Review of Lignocellulosic-Derived Nanoparticles for Drug Delivery Applications: Lignin Nanoparticles, Xylan Nanoparticles, and Cellulose Nanocrystals. *Molecules* 2021. 26 (676). p. 1–22 <https://doi.org/10.3390/molecules26030676>
40. С.М. Шульга, О.О. Тігунова, В.В. Братішко, Я.Б. Блюм. Біобутанол: продуценти, субстрати, культивування та відновлення. Київ. Наукова думка. 2024. 267 с.

ДОДАТКИ

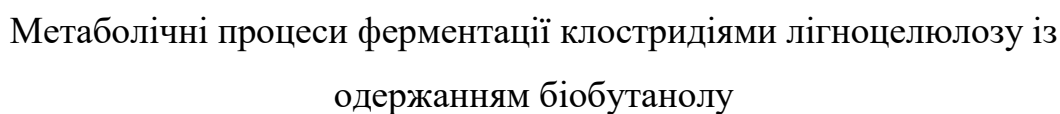
Додаток А

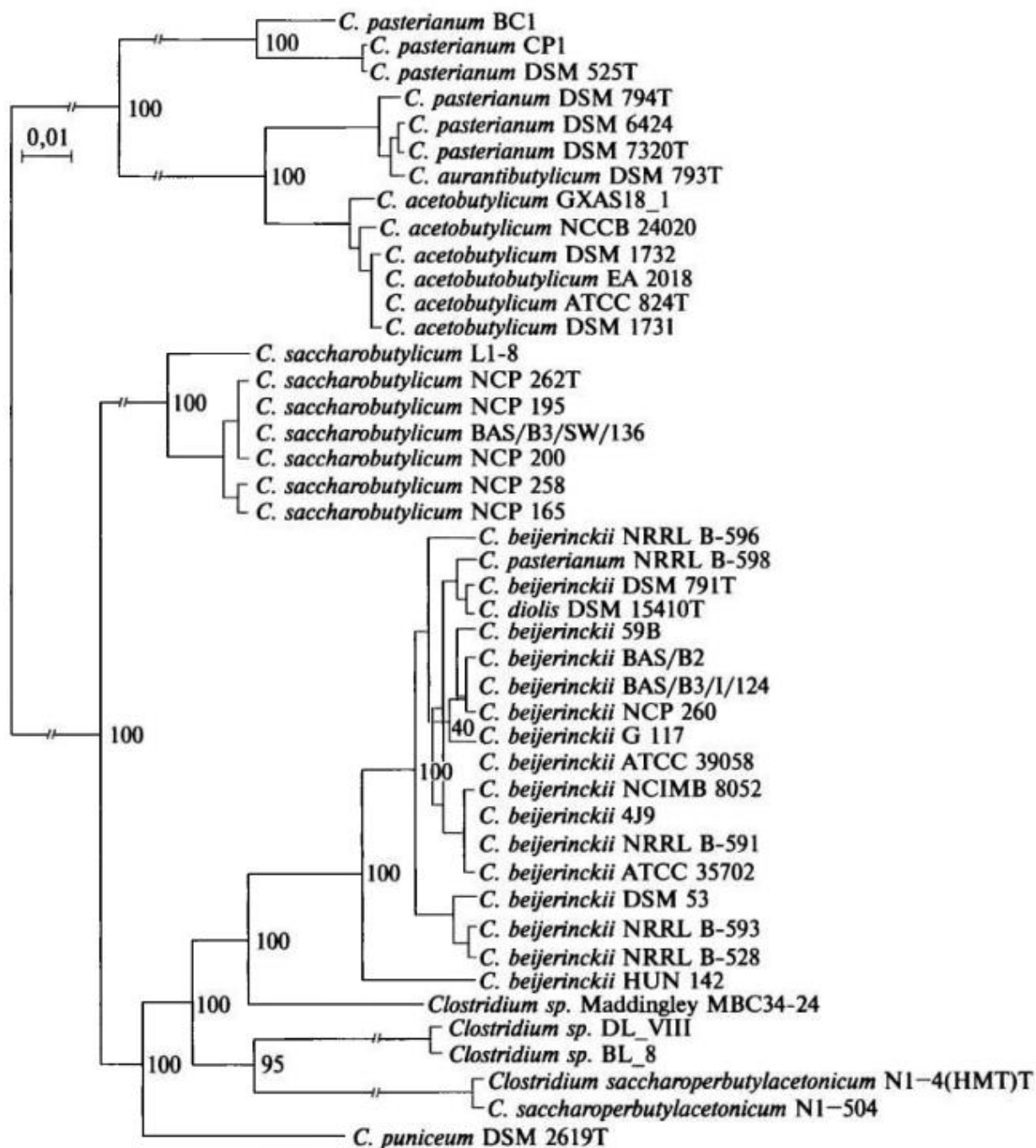
Технологічні характеристики одноатомних спиртів

Спирт	Властивості
Метанол	Найбільше октанове число Покращення паливної економічності на 10–15 % ККД двигуна підвищується на 5–15 % порівняно з бензином. Висока токсичність і агресивність щодо конструкційних матеріалів. Вміст у відпрацьованих газах оксидів азоту знижується на 25–30 % порівняно з роботою на бензині
Етанол	Октанове число істотно вище, ніж бензину Розшарування за наявності води Необхідна модифікація двигуна при збільшенні вмісту Низька теплота згоряння – пара етанолу розсіюється швидше, ніж пара бензину Менш токсичний, ніж бензин, не містить канцерогенних компонентів Пара етанолу менш вогнебезпечна, ніж пара бензину через вищу температуру самозаймання Електропровідність значно вища, ніж у бензину, що знижує небезпеку накопичення статичної електрики під час руху палива, у тому числі і в паливній системі
Бутанол	Октанове число вище, ніж у бензину Енергоємність бутанолу близька до енергоємності бензину Суміш не розшаровується в присутності води Легко змішується зі звичайним бензином Не вимагає модифікації двигуна Не володіє корозійними властивостями Низький тиск парів біобутанолу не повинен призводити до появи високих рівнів емісії летких органічних сполук

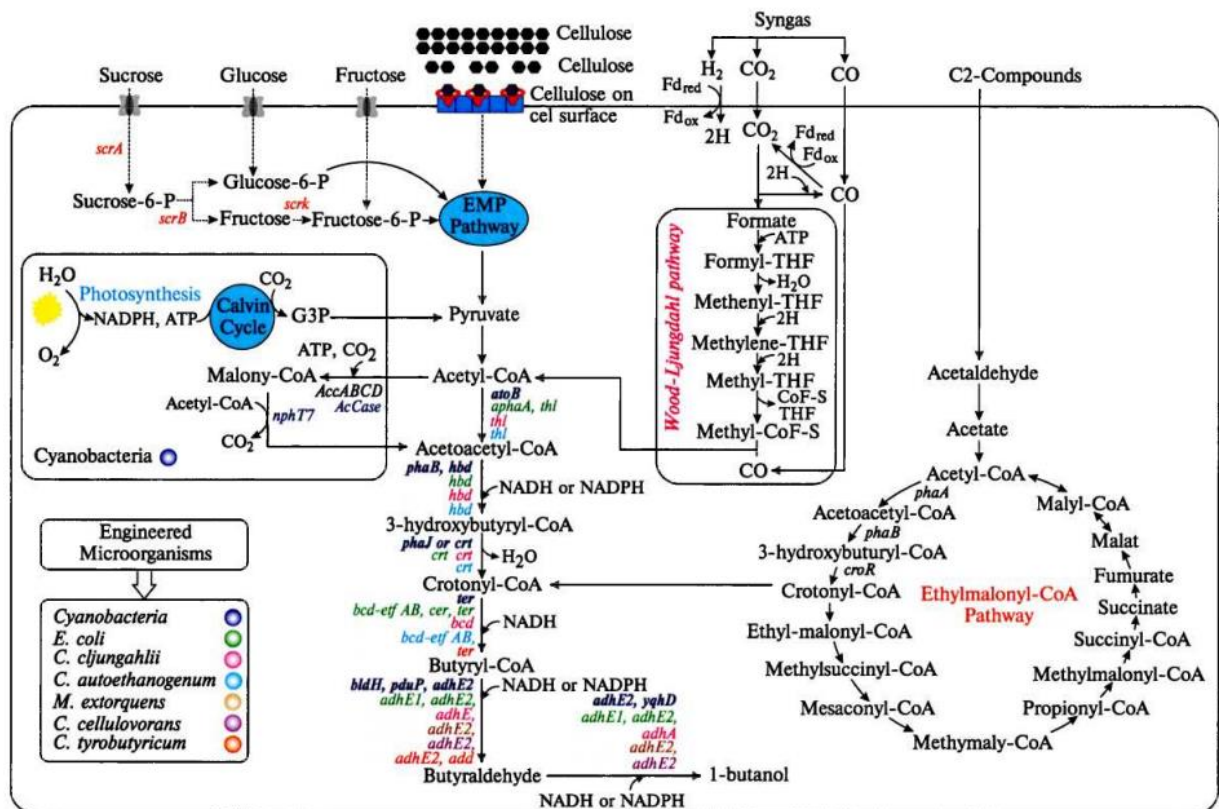


Інтегральний підхід до біотехнологічного процесу виробництва бутанолу із лігніноцелюлозних субстратів





Генетична карта клостридій – продуцентів біобутанолу



Схематичне зображення утворення бутанолу гетеролітичними господарями з різних відходів. Кольорами позначені гетерологічні гени, які експресуються у різних господарів (Wang et al., 2020)