

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
Кафедра екології та технології рослинних полімерів**

«На правах рукопису»

УДК 676

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри

_____ В.В. Галиш

«__» _____ 2025 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
зі спеціальності 161 Хімічні технології та інженерія
на тему: «Вплив лужної та кислотної обробки на ефективність
переробки шкаралуп волоського горіха та кісточок абрикоса»**

Виконав:

студент II курсу, групи ЛЦ-41МП Драган Даніїл Іванович _____

Керівник:

доц., доц., д.т.н. Галиш Віта Василівна _____

Консультант:

розробка стартап-проекту

доц., доц., к.е.н. Юдіна Наталія Володимирівна _____

Рецензент: _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ 2025

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут (факультет) автоматизації, промислової інженерії та екології

Кафедра екології та технології рослинних полімерів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія

Освітньо-професійна програма Промислова екологія та ресурсоефективні чисті технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ В.В. Галиш

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

_____ Драгану Даніїлу Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Вплив лужної та кислотної обробки на ефективність переробки шкаралуп волоського горіха та кісточок абрикоса

науковий керівник дисертації Галиш Віта Василівна, д.т.н., доц.
затверджені наказом по університету від «03» листопада 2025 р. № 4744-с

2. Термін подання студентом дисертації «15» грудня 2025 р.

3. Об'єкт дослідження шкаралупи волоського горіха та кісточки абрикоса.

4. Предмет дослідження процеси лужної та кислотної обробки шкаралуп плодово-ягідних культур.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

- а) Провести дослідження впливу у кислому середовищі на компоненти сировини агропромислового комплексу
- б) Провести дослідження впливу у лужному середовищі на компоненти сировини агропромислового комплексу
- в) визначити закономірності впливу видообробок на властивості отриманого продукту
- в) провести аналіз ринку виробництва біопалива

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу 1) актуальність тематики; 2) мета дослідження; 3) завдання дослідження; 4) об'єкт дослідження; 5) предмет дослідження; 6) методи дослідження; 7) результати дослідження; 8) результати розробки стартап-проекту; 9) перелік публікацій; 10) висновки; 11) апробація результатів магістерської дисертації.

7. Орієнтовний перелік публікацій: Dragan D., Halysh V. Pretreatment of walnut shells and apricot kernels for polysaccharide isolation. Збірник тез доповідей XXXVII всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів , 01-10 грудня 2025 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського , 2025. – 268-271 С.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проекту	Юдіна Н.В. доц.		

9. Дата видачі завдання « 28 » жовтня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Літературний огляд	28.10-08.11	
2	Оформлення методичної частини	09.11-15.11	
3	Опис результатів досліджень	16.11-22.11	
4	Стартап-проект	23.11-29.11	
5	Охороно навклишнього середовища	30.11-06.12	
6	Оформлення пояснювальної записки	07.12-12.12	

Студент _____

Д.І. Драган

Науковий керівник дисертації _____

В.В. Галиш

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 107 стор., 6 рис., 29 табл., 1 дод., 39 пос.

Актуальність теми. Зростання потреби в альтернативних джерелах енергії та необхідність ефективної утилізації рослинних відходів зумовлюють підвищений інтерес до використання лігноцелюлозної біомаси для виробництва біопалива другого покоління. Дослідження впливу лужної та кислотної обробки на переробку шкаралуп волоського горіха та кісточок абрикоса є актуальним з огляду на можливість підвищення ефективності їх використання, зменшення екологічного навантаження та впровадження ресурсоефективних технологій.

Мета та основні завдання: Мета - встановити вплив лужної та кислотної обробки на фізико-хімічні властивості шкаралупи волоського горіха та кісточок абрикоса з метою підвищення ефективності їх подальшої переробки на біопаливо.

Для досягнення мети було поставлено наступні завдання:

- 1) Проаналізувати науково-технічну літературу щодо методів обробки рослинної сировини у виробництві біопалива.
- 2) Визначити хімічний склад шкаралупи волоського горіха та кісточок абрикоса.
- 3) Дослідити вплив кислотної та лужної обробки на вихід та склад твердого залишку зі шкаралуп плодово-ягідних культур.
- 4) Розробити стартап-проект, спрямований на комерціалізацію технології переробки шкаралупи волоського горіха та кісточок абрикоса після кислотної та лужної обробки.

Об'єкт дослідження: шкаралупи волоського горіха та кісточка абрикоса.

Предмет дослідження: процеси лужної та кислотної обробки шкаралуп плодово-ягідних культур.

Методи дослідження: магістерська дисертація базується на експериментальних і теоретичних методах дослідження.

Апробація результатів дисертації: Dragan D. , Halysh V. Pretreatment of walnut shells and apricot kernels for polysaccharide isolation. Збірник тез доповідей XXXVII всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів", 01-10 грудня 2025 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2025. – 268-271 С.

БЮПАЛИВО ДРУГОГО ПОКОЛІННЯ, ЛІГНОЦЕЛЮЛОЗНА
БІОМАСА, ШКАРАЛУПА ВОЛОСЬКОГО ГОРІХА, КІСТОЧКИ
АБРИКОСА, ЛУЖНА ОБРОБКА, КИСЛОТНА ОБРОБКА, ПОПЕРЕДНЯ
ХІМІЧНА ОБРОБКА, БІОЕНЕРГЕТИКА, ВТОРИННА РОСЛИННА
СИРОВИНА

ABSTRACT

Master's thesis: 107 pages, 6 figures, 29 tables, 1 appendix, 39 illustrations.

Relevance of the topic. The growing need for alternative energy sources and the need for effective utilization of plant waste are leading to increased interest in the use of lignocellulosic biomass for the production of second-generation biofuels. Research into the impact of alkaline and acid treatment on the processing of walnut shells and apricot kernels is relevant in view of the possibility of increasing the efficiency of their use, reducing environmental impact, and implementing resource-efficient technologies.

Purpose and main objectives: The purpose is to establish the effect of alkaline and acid treatment on the physicochemical properties of walnut shells and apricot kernels in order to increase the efficiency of their further processing into biofuel.

To achieve the goal, the following tasks were set:

- 1) To analyze the scientific and technical literature on methods of processing plant raw materials in the production of biofuels.
- 2) To determine the chemical composition of walnut shells and apricot kernels.
- 3) To investigate the effect of acid and alkaline treatment on the yield and composition of solid residue from fruit and berry shells.
- 4) To develop a startup project aimed at commercializing the technology of processing walnut shells and apricot kernels after acid and alkaline treatment.

Research object: walnut shells and apricot kernels.

Subject of research: processes of alkaline and acid treatment of fruit and berry shells.

Research methods: the master's thesis is based on experimental and theoretical research methods.

Approbation of the results of the dissertation: Dragan D. , Halysh V. Pretreatment of walnut shells and apricot kernels for polysaccharide isolation. Collection of abstracts of the XXXVII All-Ukrainian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Equipment of chemical production of enterprises of building materials", December 1-10, 2025, Kyiv) / Compiled by Ya.M. Kornienko. – K.: "KPI im. Igor Sikorsky", 2025. – 268-271 P.

SECOND-GENERATION BIOFUEL, LIGNOCELLULOUS BIOMASS,
WALNUT SHELL, APRICOT STONE, ALKALINE TREATMENT, ACID
TREATMENT, CHEMICAL PRE-TREATMENT, BIOENERGY, SECONDARY
PLANT RAW MATERIAL

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	10
1.1 Характеристика різних рослинних відходів.....	10
1.2 Одержання біопалива з вторинної рослинної сировини.....	15
1.3 Способи попередньої обробки рослинної сировини	25
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	31
2.1 Характеристика об'єктів дослідження	31
2.2 Попередня обробка рослинної сировини.....	32
2.3 Ферментативний гідроліз	33
2.4 Характеристика одержаних продуктів	34
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ	36
3.1 Дослідження хімічного складу шкаралуп волоського горіха та кісточок абрикоса.....	36
3.2 Порівняльна оцінка впливу кислотної та лужної обробки на властивості субстрату	38
3.3 Характеристика відпрацьованих розчинів кислотної обробки	44
3.4 Біохімічна конверсія полісахаридної складової.....	46
3.5 Баланс сировини.....	50
4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ	53
5 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	93
ВИСНОВКИ.....	99
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	101
ДОДАТОК. АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	105

ВСТУП

У ХХІ столітті питання енергетичної безпеки та екологічної стійкості набувають пріоритетного значення у глобальному масштабі. Зростання попиту на енергоресурси, обмеженість викопних палив, негативні наслідки їх використання - зокрема забруднення довкілля та збільшення викидів парникових газів - вимагають переходу до альтернативних, відновлюваних та екологічно безпечних джерел енергії. Біоенергетика, особливо виробництво біопалива другого покоління, розглядається як один із найбільш перспективних шляхів зменшення залежності від викопних видів палива та розвитку циркулярної економіки.

Біопаливо другого покоління виготовляється з неліквідної, непродовольчої біомаси та різноманітних рослинних відходів, які у великій кількості утворюються в агропромисловому, харчовому, деревообробному та переробному секторах. На відміну від першого покоління, яке базується на продовольчих культурах (зернових, олійних, цукровмісних), біопаливо другого покоління не створює конкуренції харчовій продукції, забезпечує підвищення ресурсної ефективності та сприяє зменшенню обсягів відходів, що підлягають утилізації.

Рослинні відходи є надзвичайно доступною та малоцінною, але водночас високопотенційною сировиною. До таких відходів належать солома, стебла та лушпиння сільськогосподарських культур, тирса, кора, лушпиння насіння, шкаралупи та кісточки плодів. Україна щорічно генерує сотні тисяч тонн рослинних відходів, значна частина яких не використовується ефективно й часто спалюється, компостується або потрапляє на полігони твердих побутових відходів. Такий підхід не лише спричиняє втрату цінного енергетичного ресурсу, а й призводить до додаткових викидів CO₂ та інших забруднювальних речовин.

Серед широкого спектра рослинних відходів особливу увагу привертають шкаралупа волоського горіха та кісточки абрикоса - тверді

лігноцелюлозні матеріали, які характеризуються високою щільністю, значною теплотворною здатністю та стабільною структурою. У процесі переробки горіхів та кісточкових плодів утворюються значні обсяги цих відходів, які, як правило, не використовуються у промислових цілях, хоча їхній хімічний склад (целюлоза, геміцелюлози, лігнін) робить їх придатними для виробництва різних видів біопалива.

Однак ефективність перетворення лігноцелюлозної біомаси на біопаливо значною мірою залежить від її попередньої обробки. Лужна та кислотна обробки є поширеними методами хімічної модифікації біомаси, які дозволяють деструктувати клітинні стінки, видалити частину лігніну та геміцелюлоз, збільшити пористість матеріалу, змінити теплотехнічні характеристики та реакційну здатність сировини.

Лужна та кислотна обробки є одними з найефективніших методів деструкції лігноцелюлозної структури, що сприяє покращенню доступності компонентів біомаси для подальших процесів термічної, хімічної або біотехнологічної трансформації. З огляду на це актуальним є дослідження впливу лужних і кислотних методів модифікації рослинних відходів на їх фізико-хімічні та структурні властивості як перспективної сировини для біоенергетики.

Отже, мета магістерської дисертації - встановити вплив лужної та кислотної обробки на фізико-хімічні властивості шкаралупи волоського горіха та кісточок абрикоса з метою підвищення ефективності їх подальшої переробки на біопаливо.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Характеристика різних рослинних відходів

Глобальне зростаюче прагнення зменшити залежність від викопного палива вимагає розвитку альтернативних джерел енергії, таких як біопаливо [1]. Оскільки традиційні енергетичні ресурси негативно впливають на навколишнє середовище, а також на кліматичні зміни, необхідність зосередитися на розвитку альтернативної енергетики є незамінною в сучасному суспільстві. Використання рослинних відходів як сировини для виробництва біопалива є інноваційним підходом до вирішення проблем, пов'язаних з управлінням відходами, залежністю від викопного палива та шкідливими викидами парникових газів. Окрім економічної складової, використання рослинних відходів для виробництва біопалива відіграє життєво важливу роль у зменшенні викидів CO₂ [2].

Рослинні відходи, або лігноцелюлозні біомаси, охоплюють багато груп за походженням. До них належать енергетичні культури, залишки сільськогосподарських культур, відходи садово-городнього господарства, лісові та деревопереробні відходи, органічні побутові залишки, водна біомаса (водорості, осади стічних вод), а також різні промислові побічні продукти. Сільськогосподарські відходи поділяють на первинні (солома зернових, стебла кукурудзи, стебла соняшника, гілки й кущі) та вторинні (лушпиння насіння, макуха, пивна дробина, фруктові відходи). Часто одна категорія може належати до кількох груп одночасно, наприклад лушпиння соняшника є і сільськогосподарським, і харчовим відходом [3].

У світі використання рослинної біомаси забезпечує значну частину енергетичних потреб. Орієнтовно понад дві мільярди тонн умовного палива на рік припадають саме на біомасу. В Україні потенціал рослинної біомаси оцінюється приблизно у 24 мільйони тонн умовного палива щорічно, серед яких найбільшу частку становлять солома зернових, стебла кукурудзи, стебла та лушпиння соняшника та деревинні відходи. У цілому рослинні залишки

агропромислового комплексу становлять близько третини всього біоенергетичного потенціалу країни.

Таблиця 1.1 - Хімічний склад основних видів рослинних відходів [4]

Вид рослинних відходів	Целюлоза, %	Геміцелюлози, %	Лігнін, %	Основні Відмінності / Особливості
Загальна рослинна біомаса	35–55	20–40	10–25	Основа для більшості видів біомаси.
Шкаралупа волоського горіха	~25–35	~15–25	~30–45	Високий вміст лігніну (порівняно зі стеблами). Висока твердість.
Шкаралупа абрикосових кісточок	~25–30	~25–30	~25–30	Досить збалансований вміст усіх трьох компонентів.
Солома (зернових культур)	~35–45	~25–35	~10–20	Типовий аграрний лігноцелюлозний залишок.
Макуха (загалом)	~10–20	~10–20	~5–15	Низький вміст лігноцелюлози; високий вміст білка та жирів (залишків).
Фруктові/Овочеві відходи (м'якоть)	~5–15	~5–10	<5	Високий вміст водорозчинних вуглеводів (цукрів) та пектинів.

Рослинні відходи мають широкий спектр використання і можуть слугувати сировиною для багатьох технологій.

З рослинних залишків виробляють тверде паливо (пелети, брикети), рідке (біоетанол, біодизель) та газове паливо (біогаз). Наприклад, зі стебел і лушпиння отримують біоетанол, а з гною та харчових відходів метан у біогазових установках [5]. Багато видів біомаси придатні для виготовлення компосту, який покращує структуру ґрунту та підвищує вміст органічної речовини [6].

Лігноцелюлозні матеріали можуть поглинати забруднювачі після термічної або хімічної обробки. Шкаралупа волоського горіха і кісточок абрикоса є придатною сировиною для одержання активованого вугілля та очищення стічних вод [7]. З рослинних відходів добувають біорозкладні полімери, які застосовують у пакуванні, текстилі та композитних матеріалах. Натуральні волокна слугують підсилювачами у композитах, надаючи їм міцності та низької теплопровідності [8].

Солома зернових культур містить до 50% целюлози й до 25% лігніну. Її використовують як паливо, утеплювач, підстилку та компонент компосту [9]. Лушпиння насіння (соняшника, рису, гречки, горіхів) є твердим волокнистим матеріалом, який застосовують для виробництва активованого вугілля, сорбентів і наповнювачів [10].

Стебла та качани кукурудзи містять приблизно 40% целюлози та 20% геміцелюлози. Вони служать сировиною для пелет і біоетанолу. Цукробуряковий жом має високий вміст цукрів та нерозчинних волокон і використовується у тваринництві та виробництві біогазу.

Фруктові кісточки складаються з дерев'янистої оболонки та ядра, що містить олії та білки. Тверда частина застосовується для виготовлення активованого вугілля, а ядра - для отримання олії. Шкаралупа волоських горіхів містить до 30% лігніну і приблизно 50% полісахаридів. Завдяки

міцності використовується як абразив, наповнювач і сировина для отримання активованого вугілля [11].

Макуха олійних культур багата на білки й залишкові жири, тому слугує цінним кормовим продуктом. Шкаралупа волоського горіха має високу твердість, деревинну структуру та значну частку вуглецю, що робить її придатною для виробництва активованого вугілля та абразивних матеріалів. Подрібнена шкаралупа додається у будівельні та композитні матеріали. Кісточки абрикоса містять деревинну шкаралупу з лігніном і целюлозою та ядро з оліями. Шкаралупа після термічної чи хімічної обробки перетворюється на високоякісні сорбенти, а ядра можуть бути джерелом біоолії.

Світові обсяги біомаси зростають і забезпечують приблизно 14% енергоспоживання. Україна має значний потенціал аграрної біомаси, який оцінюється у 30–35 мільйонів тонн умовного палива на рік. Формування великої кількості рослинних відходів є одночасно екологічним викликом і можливістю для впровадження новітніх технологій переробки.

Активно вивчаються методи підвищення ефективності переробки лігноцелюлозних матеріалів: термічні, хімічні та біологічні попередні обробки, карбонізація й активація горіхових та абрикосових відходів для отримання нанопористих сорбентів. Розробляються технології ферментації для виробництва біоетанолу, біогазу чи біопродуктів з соломи та кукурудзяних стебел. Створюються біокомпозити на основі соломи, високоякісні паливні гранули та гібридні біогазові установки.

Таким чином, рослинні відходи є цінним ресурсом, потенціал якого можна використовувати у біоенергетиці, матеріалознавстві, екологічних технологіях та сільському господарстві. Перехід від традиційного спалювання до комплексної переробки забезпечує економічну вигоду та екологічну стійкість [12].

Дослідження рослинних відходів, зокрема твердих кісточкових матеріалів, стає важливим елементом переходу до безвідходних технологій та створення замкнених виробничих циклів. В умовах сучасної циркулярної

економіки дедалі більшої уваги набувають підходи, що дозволяють не просто утилізувати біомасу, а перетворювати її на продукти з доданою вартістю. Горіхові та фруктові кісточки, які ще зовсім недавно вважалися малоприслужними відходами, демонструють високий потенціал завдяки стійкій структурі, насиченій лігніном, та значній кількості полісахаридів. Це робить їх придатними для біоконверсії, карбонізації, отримання цукрів, піролізних рідин, біовугілля або навіть компонентів каталізаторів [13].

Зростає інтерес і до використання таких матеріалів як природних сорбентів у процесах вилучення важких металів та органічних забрудників зі стічних вод, адже подрібнені кісточкові відходи після попередньої обробки демонструють значну адсорбційну здатність. Це надає можливість об'єднати напрями екологічної інженерії, біоенергетики та хімічної технології в рамках єдиних технологічних ланцюгів. Такий підхід відповідає світовим трендам зі створення інтегрованих біорефінерій, які використовують рослинну сировину комплексно, мінімізуючи обсяг відходів та максимізуючи вихід кінцевих продуктів.

Оцінка властивостей кісточкових матеріалів та визначення оптимальних умов їх хімічної модифікації є важливими завданнями для промислової практики. Розуміння поведінки біомаси під дією кислотних і лужних реагентів дозволяє не лише підвищити ефективність отримання біопалива або сорбентів, але й прогнозувати поведінку матеріалу у масштабних технологічних процесах. Використання таких відходів як цінної технічної сировини є перспективним напрямом для розвитку низьковуглецевих технологій, що поєднують економічну доцільність та екологічну безпечність [14].

Рослинна біомаса може бути використана як стале джерело органічного вуглецю для створення біоенергії, або безпосередньо у формі тепла та електроенергії, або як рідке біопаливо, що виробляється термохімічними або біохімічними методами, або їх комбінацією. На відміну від викопних джерел енергії, які є результатом тривалої трансформації органічної речовини, рослинна біомаса створюється шляхом фотосинтезу з використанням

вуглекислого газу як джерела вуглецю та сонячного світла як джерела енергії, і тому швидко виробляється. Світове щорічне виробництво біомаси оцінюється в 146 мільярдів метричних тонн, що може становити 9-13% світового енергопостачання, даючи 45 ± 10 EJ на рік [15].

1.2 Одержання біопалива з вторинної рослинної сировини

Біопаливо – це паливо, виготовлене з відновлюваних органічних матеріалів (біомаси), яке може замінювати або доповнювати викопні паливні ресурси. За фізичним станом та способом застосування виділяють рідкі (біоетанол, біодизель), газоподібні (біогаз) і тверді види біопалива. Біоетанол отримують у процесі переробки рослинної сировини, зокрема зернових та цукрових культур, і застосовують як моторне паливо або його компонент. Біодизель виробляють із рослинних олій шляхом хімічної реакції переестерифікації; його використовують у дизельних двигунах. Біогаз отримують завдяки анаеробній ферментації органічних відходів, а метан, що входить до його складу, застосовують для отримання теплової та електричної енергії. До твердих видів біопалива належать деревні відходи, тріска, гранули та різноманітні рослинні рештки [16].

З погляду походження сировини біопалива поділяють на перше, друге та третє покоління. Біопалива першого покоління виробляють переважно з харчових культур, багатих на крохмаль або цукри (зернові, цукрова тростина, кукурудза, пшениця), що створює конкуренцію з продовольчим сектором і може впливати на продовольчу безпеку. Друге покоління базується на лігноцелюлозній сировині, відходах лісового господарства, соломі, кукурудзяних рештках, харчових та переробних відходах, зокрема шкаралупі горіхів і кісточках плодів. Такі відходи не є харчовим ресурсом, формуються у великих обсягах і вважаються ключовою сировиною для модерних біоенергетичних технологій. Третє покоління пов'язане переважно з використанням мікро- та макроводоростей, які характеризуються високою

швидкістю росту і здатністю накопичувати ліпіди, однак потребують складніших технологій культивування та переробки.

Основними технологічними шляхами перетворення рослинної сировини на біопаливо є такі: Ферментація (бродіння). Органічні вуглеводи, такі як цукри та крохмаль, під дією мікроорганізмів перетворюються на спирти (наприклад, біоетанол) або на метан під час утворення біогазу. Біоетанол отримують шляхом дріжджового бродіння цукровмісної сировини, а біогаз утворюється в умовах безкисневого розкладання органічних матеріалів [17].

Піроліз. Це термічне розкладання біомаси за високих температур і відсутності кисню. У результаті процесу отримують біо-олію, синтез-газ і біочар. Співвідношення продуктів визначається температурним режимом та умовами піролізу. Біо-олію використовують як паливо або для подальшої переробки, а біочар застосовують як паливо або ґрунтову добавку [18].

Гідротермічна обробка полягає у перетворенні вологих біомас у водному середовищі за високих температур і тиску, іноді з використанням каталізаторів. У таких умовах органічні речовини розкладаються з утворенням рідких вуглеводнів, газів і карбонових кислот. Метод є ефективним для переробки біомаси з високим вмістом вологи, наприклад трави, харчових відходів або стічних вод.

Естерифікація та трансестерифікація це хімічні процеси, у ході яких жирні кислоти або рослинні олії реагують зі спиртами (переважно метанолом чи етанолом) у присутності каталізаторів, утворюючи алкілефіри (біодизель) і гліцерин. Такий підхід дозволяє отримати готове двигунне паливо з олійної сировини.

Для виробництва біопалива використовують як традиційні культури (цукровий буряк, кукурудзу, ріпак, сою), так і відходи рослинництва та переробки. Особливе значення мають лігноцелюлозні ресурси деревини, солома, очерет, а також побічні продукти аграрної та деревообробної промисловості. Серед них важливе місце займають шкаралупа горіхів, кісточки абрикоса, персика, сливи, лущиння насіння. Такі матеріали містять

целюлозу, геміцелюлозу та лігнін, що дає змогу застосовувати їх у ферментаційних, термохімічних і гідротермальних технологіях після попередньої підготовки. Лігноцелюлозні відходи вважаються одним із найперспективніших видів сировини для виробництва біопалива другого покоління [18].

Для вторинної рослинної сировини, зокрема горіхових шкаралуп та фруктових кісточок, найчастіше розглядають комбіновані технологічні схеми, що поєднують декілька стадій перетворення. На першому етапі проводять механічне подрібнення та, за потреби, фракціонування матеріалу з метою підвищення питомої поверхні та вирівнювання гранулометричного складу. Далі застосовують різні варіанти попередньої хімічної обробки кислотну, лужну, окиснювальну чи органосольвельну, які змінюють структуру лігноцелюлозного комплексу й забезпечують делігніфікацію або частковий гідроліз полісахаридів. На завершальних стадіях матеріал або піддають ферментативному гідролізу з наступним одержанням біоетанолу чи інших біохімічних продуктів, або використовують у термохімічних процесах для отримання біоолії, синтез-газу та піролізного вуглецю. Інтеграція таких ланцюгів у концепцію біорефінерії дозволяє максимально повно використовувати енергетичний і хімічний потенціал відходів, поєднуючи виробництво палива з одержанням сорбентів, біоматеріалів чи допоміжних хімічних продуктів.

Тверді кісточкові матеріали, до яких належать шкаралупа волоського горіха та кісточки абрикоса, мають низку технологічних особливостей порівняно з іншими видами рослинної сировини. Вони характеризуються високою об'ємною густиною, підвищеною механічною міцністю та значним вмістом лігніну, що ускладнює їх пряме біохімічне перетворення. Водночас елементний склад таких відходів (підвищена частка вуглецю, низький вміст мінеральних домішок, відносно низька зольність) робить їх перспективною сировиною для термохімічних технологій піролізу, газифікації та одержання висококалорійного твердого біопалива. Попередня хімічна або термохімічна

модифікація цих матеріалів забезпечує підвищення реакційної здатності, зменшення структурної стійкості й, відповідно, збільшення виходу цільових продуктів біопереробки.

Використання біопалива має суттєві екологічні та економічні переваги. Рослини, з яких отримують сировину, поглинають вуглекислий газ під час росту, завдяки чому формується майже замкнений вуглецевий цикл. Це дозволяє суттєво скоротити загальні викиди парникових газів у порівнянні з викопним паливом. Біопалива також сприяють зміцненню енергетичної незалежності, оскільки зменшують потребу в імпорті традиційних енергоносіїв. Крім того, виробництво біопалива стимулює розвиток місцевої економіки, створює нові робочі місця та забезпечує додаткові джерела доходу для аграрного сектору. Багато різновидів біопалива є нетоксичними та біорозкладними, що знижує ризики забруднення довкілля.

Одержання біопалива з рослинної сировини є комплексним процесом, який поєднує можливості традиційного сільського господарства та сучасних технологій переробки. Використання лігноцелюлозних відходів відкриває перспективи розвитку біопалив другого покоління без конкуренції з харчовим сектором. Сукупність екологічних та економічних переваг робить біопаливо важливим напрямом сталого розвитку енергетики.

Окрім усталених підходів, у світовій практиці стрімко розвиваються інноваційні технології, спрямовані на підвищення ефективності перетворення рослинної біомаси. Особливої уваги набувають методи біоконверсії лігноцелюлозних матеріалів, зокрема біомаси з високою щільністю та вмістом лігніну, до яких належать шкаралупи кісточкових плодів. Одним із ключових етапів таких процесів є попередня хімічна обробка, що дозволяє руйнувати жорстку структуру біополімерного комплексу й забезпечувати доступність полісахаридів для подальшої ферментації, гідролізу або термохімічного перетворення. Вибір методу обробки визначає не лише вихід біопалива, а й якісний склад продуктів, кількість інгібіторів та загальну енергоефективність технології.

Сучасні дослідження демонструють, що використання кислотної чи лужної обробки здатне суттєво збільшити вихід цукрів або рідких продуктів у порівнянні з необробленою сировиною. Лужна обробка, як правило, ефективніше руйнує лігнін і покращує доступність целюлози, тоді як кислотна дозволяє вилучити значну частину геміцелюлоз та знизити кристалічність полісахаридів. Для твердих і надзвичайно щільних матеріалів, таких як шкаралупа волоського горіха чи кісточок абрикоса, ці процеси відіграють визначальну роль, оскільки саме від попереднього руйнування структури залежить ступінь подальшого гідролізу та ефективність отримання енергетичних продуктів [19].

У цьому контексті фруктові кісточки та горіхові шкаралупи розглядаються як перспективна сировина для виробництва біопалива другого покоління, що не конкурує з харчовою продукцією та формує додаткові можливості для агропромислового сектору. Їх застосування дозволяє зменшити обсяг відходів, перетворюючи їх на корисні продукти, а також знижує потребу у вирощуванні спеціальних енергетичних культур. Оцінка ефективності хімічної обробки таких матеріалів стає важливим етапом оптимізації технологічних схем переробки та підвищення загальної результативності виробництва біопалива.

Таким чином, дослідження впливу різних методів хімічної підготовки на властивості лігноцелюлозних відходів має не лише наукове, а й прикладне значення. Воно дозволяє обґрунтувати вибір технологічних параметрів, адаптувати процеси до особливостей конкретної сировини та створювати більш ефективні, економічно вигідні та екологічно безпечні системи виробництва біопалива.

Рослинна біомаса розглядається як перспективне й відновлюване джерело органічного вуглецю. Її можна застосовувати для отримання теплової та електричної енергії, а також для синтезу рідких біопалив за допомогою термохімічних або біохімічних технологій. На відміну від викопних видів палива, що формуються тисячоліттями, рослинна біомаса утворюється

завдяки фотосинтезу, використовуючи сонячну енергію та вуглекислий газ. Завдяки цьому вона щороку відновлюється у значних обсягах і здатна покривати помітну частку глобальних енергетичних потреб.

Основу більшості рослинних матеріалів становить лігноцелюлоза комплекс структурних полімерів клітинної стінки. У деревині частка лігноцелюлози досягає 60–80%, у стеблах різних трав 30–60%, а в листі 15–30%. На відміну від крохмалю чи сахарози, ці компоненти не використовуються людиною як харчовий ресурс, тому їх переробка не конкурує з продовольчим сектором[19].

Лігноцелюлозний матеріал складається переважно з трьох полімерів: целюлози, геміцелюлози та лігніну. Співвідношення цих компонентів змінюється залежно від виду рослини, умов вирощування, клімату та місця походження. Окрім основних полімерів, у клітинній стінці містяться також пектини, білково-вуглеводні комплекси, крохмаль, мінеральні речовини, смоли, віск і таніни.

Целюлоза є довголанцюговим полісахаридом, побудованим із залишків глюкози, з'єднаних β -1,4-глікозидними зв'язками. Її молекули формують впорядковані мікрофібрили, стабільність яких забезпечується численними водневими та гідрофобними взаємодіями. Саме щільна напівкристалічна структура робить целюлозу стійкою до хімічного та ферментативного руйнування. Попри однакову хімічну формулу, целюлоза різних рослин може відрізнятися ступенем кристалічності та характером взаємодії з іншими складовими клітинної стінки [19].

Геміцелюлоза, на відміну від целюлози, має гетерогенний склад і містить різні моносахариди - це пентози, гексози, ацетильовані та кислотомісні цукри. Вона є більш розгалуженим полімером і менш стійка до гідролізу. У деревині листяних порід переважають ксилани, тоді як у хвойних глюкоманани.

Лігнін є аморфним полімером фенольної природи і утворює гідрофобну матрицю, яка оточує мікрофібрили й захищає їх від руйнування. Завдяки

ковалентним зв'язкам між лігніном, геміцелюлозою та целюлозою клітинна стінка проявляє високу механічну міцність, хімічну інертність та біостійкість. Найбільше лігніну міститься в деревині, менш у трав'яних рослинах та агровідходах [19].

Для біопереробки використовують кілька груп лігноцелюлозної сировини. До деревної належать тверді та м'які породи, а також лісові залишки тирси, тріски, обрізки. Останніми роками активно застосовують швидкорослі енергетичні дерева, зокрема тополя та вербу, у тому числі з модифікованими властивостями деревини. Перевагою деревної сировини є висока щільність і можливість заготівлі без сезонних обмежень.

Велику групу становлять агровідходи: стебла кукурудзи, рисова та пшенична солома, жом цукрової тростини. Значна частина таких матеріалів не використовується та лишається на полях, тому їх переробка може забезпечити додатковий ресурс для біопалива. Цукрова тростина вирізняється особливо високою продуктивністю біомаси, а її волокнистий жом (багаса) є доступним джерелом целюлози для виробництва біоетанолу другого покоління.

До окремої групи відносять енергетичні трави: міскантус, просо, люцерну. Вони характеризуються низькими вимогами до ґрунтів, швидким ростом, високою врожайністю та значним вмістом вуглеводів.

Крім рослинної біомаси, як сировину другого покоління можна застосовувати тверді побутові відходи, харчові залишки, стічні води, мул очисних споруд та промислові відходи паперової й целюлозної галузі. Побутові відходи містять значну частку органічних матеріалів і целюлози, однак їх переробку ускладнює неоднорідність складу, тому потрібне сортування та попередня стерилізація.

Багатообіцяючим джерелом вуглеводів є промислові відходи паперового виробництва. Паперовий шлам містить коротковолокнисту целюлозу, яка вже не може бути використана у виробництві паперу, але підходить для біохімічної переробки. Іншим прикладом є сульфітні відпрацьовані розчини, побічний продукт варіння целюлози, що містить розчинені цукри та лігнінові

компоненти. Після очищення та видалення інгібіторів ці розчини можуть бути використані для біотехнологічного синтезу біоетанолу.

Таблиця 1.2 - Хімічний склад різних видів біомаси [20]

Біомаса	Целюлоза	Геміцелюлоза	Лігнін
Листяна деревина	45-47	25-40	20-55
Хвойна деревина	40-45	25-29	30-60
Пшенична солома	30-49	20-50	8-20
Житня солома	30,9	21,5	25,3
Кукурудзяні качани	35-45	35-42	5-15
Кукурудзяне стебло	39-42	19-25	15-18
Рисова солома	32-47	15-27	5-24
Рисове лущиння	24-36	12-19	11-19
Цукровий очерет	40	24-30	12-25
Бермудська трава	25-48	13-35	6-19
Тверді побутові відходи – відокремлене волокно	49	16	10
Первинний муловий шлам	29,3	-	-
Згущений активний мул відходів	13,8	-	-
Тирса	45,0	15,1	25,3

Макулатура паперу з хімічної целюлози	50-70	12-20	6-10
Газети	40-55	25-40	18-20
Використаний офісний папір	55,7	13,9	5,8
Журнали	34,3	27,1	14,2
Картон	49,6	15,9	14,9
Паперовий шлам	33-61	14,2	8,4-15,4
Хімічна пульпа	60-80	20-30	2-10

Важливою перевагою використання вторинної рослинної сировини для виробництва біопалива є можливість одночасного розв'язання кількох екологічних і економічних завдань. По-перше, зменшується навантаження на полігони твердих побутових відходів і знижується практика неконтрольованого спалювання агропромислових відходів, що супроводжується викидами твердих частинок та парникових газів. По-друге, створюються передумови для формування локальних енергетичних систем, які використовують сировину, доступну безпосередньо в регіоні її утворення, що скорочує логістичні витрати та підвищує енергетичну незалежність громад. По-третє, впровадження технологій переробки шкаралупи волоського горіха та кісточок абрикоса у біопаливо та супутні продукти з доданою вартістю стимулює розвиток малого й середнього бізнесу в аграрному секторі, формуючи додаткові канали доходу для переробних підприємств та фермерських господарств [20].

Технологічні особливості переробки вторинної сировини зумовлені структурними характеристиками рослинних відходів, особливо твердих

матеріалів на кшталт горіхових шкаралуп чи фруктових кісточок, для яких найчастіше застосовують комбіновані технологічні схеми, що поєднують кілька послідовних етапів. На початковій стадії проводять механічне подрібнення та фракціонування, що сприяє збільшенню питомої поверхні і підвищує ефективність наступних процесів. Далі здійснюють попередню хімічну обробку, або претретмент, яка є вирішальним етапом підготовки лігноцелюлозної сировини, оскільки забезпечує руйнування жорсткого полімерного комплексу клітинної стінки та підвищує доступність полісахаридів целюлози й геміцелюлози для подальшого біохімічного або термохімічного перетворення. Залежно від поставлених завдань використовують кислотні, лужні, окиснювальні або органосольвольні методи обробки: лужна обробка ефективно деструктує й частково вилучає лігнін, збільшуючи реакційну здатність целюлози, тоді як кислотна сприяє гідролізу геміцелюлоз і зниженню кристалічності целюлозних волокон. Для особливо щільних матеріалів, таких як шкаралупа волоського горіха чи кісточки абрикоса, цей етап є визначальним, оскільки від ступеня руйнування структури залежить ефективність ферментативного гідролізу та вихід енергетичних продуктів.

Після первинної деструкції структура матеріалу стає придатною до основної конверсії, яка може відбуватися біохімічним або термохімічним шляхом. У першому випадку оброблену сировину піддають ферментативному гідролізу з подальшим перетворенням на біоетанол чи інші види біопалива. У другому використовують процеси піролізу або газифікації, що дозволяє одержувати біоолію, синтез-газ та піролізний вуглець. Завдяки високій механічній міцності, значному вмісту лігніну й щільності тверді кісточкові матеріали важко піддаються прямому біохімічному перетворенню, проте їхній хімічний склад це висока частка вуглецю та низька зольність це робить їх оптимальною сировиною для термохімічних процесів і виробництва висококалорійного твердого біопалива. Проведення попередньої модифікації

істотно підвищує реакційну здатність таких матеріалів і збільшує вихід цільових продуктів [20].

Використання вторинної рослинної сировини для виробництва біопалива забезпечує кілька суттєвих екологічних та економічних переваг. До екологічних переваг належать нейтральний вуглецевий цикл, оскільки під час росту рослини поглинають вуглекислий газ, що зменшує сумарні викиди парникових газів порівняно з традиційними енергоносіями; скорочення кількості відходів і навантаження на полігони; а також біорозкладність більшості видів біопалив. Економічні вигоди включають посилення енергетичної незалежності за рахунок зменшення імпорту викопних енергоносіїв, стимулювання зайнятості та створення нових джерел доходу для агропромислового комплексу й місцевих підприємств, а також зниження логістичних витрат за умови використання локальних ресурсів. Інтеграція всіх цих процесів у концепцію біорефінерії дозволяє максимально повно реалізувати потенціал рослинних відходів, поєднуючи виробництво біопалива з одержанням сорбентів, біоматеріалів та додаткових хімічних продуктів [20].

1.3 Способи попередньої обробки рослинної сировини

Попередня обробка лігноцелюлозної сировини – це комплекс методів підготовки рослинних матеріалів перед їхньою основною переробкою, спрямований на зменшення рецидивності структури, деструкцію жорсткого полімерного комплексу клітинної стінки та підвищення доступності основних біополімерів, зокрема целюлози. Методи попередньої обробки поділяють на фізичні (механічні та термічні), хімічні та біологічні (ферментативні), причому кожен із них має свої переваги та обмеження залежно від типу вихідної сировини та бажаного кінцевого продукту [21].

Механічна обробка включає подрібнення, шліфування, екструзію, дезінтеграцію та інші способи руйнування структури рослинних волокон. Основна її мета полягає у зменшенні розміру часток, руйнуванні первинної

макроструктури та збільшенні питомої поверхні матеріалу, що значно покращує проникнення реагентів або ферментів у внутрішні шари клітинної стінки. Механічний вплив знижує ступінь полімеризації целюлози, сприяє руйнуванню частини водневих зв'язків і підвищує реакційну здатність матеріалу. Особливо ефективними є методи інтенсивного подрібнення, такі як планетарне фрезерування, екструзійне розривання або ударна дезінтеграція [22].

Термічна обробка передбачає нагрівання сировини різними методами: сушінням, автоклавуванням, обробкою гарячою парою, субкритичною водою, піролізом або паровою вибуховою обробкою. Термічний вплив призводить до руйнування внутрішньої структури клітинних стінок, видалення летких компонентів, часткової дегідратації та часткової гідролізації геміцелюлоз. Парова експлозія, наприклад, поєднує дію високої температури та різкого перепаду тиску, внаслідок чого волокниста структура різко розкривається, підвищується пористість матеріалу та значно збільшується доступність целюлози для подальших хімічних або ферментативних процесів. Обробка гарячою водою у субкритичних умовах забезпечує делігніфікацію та видалення частини екстрактивних речовин без використання додаткових хімікатів [23.].

Хімічна обробка ґрунтується на використанні кислот, лугів, органічних розчинників, окисників або іонних рідин, здатних вибірково або комплексно руйнувати структуру рослинного біополімерного комплексу. Розбавлені мінеральні кислоти, як-от сірчана або хлороводнева, ефективно руйнують геміцелюлози, знижують кристалічність целюлози та виводять частину низькомолекулярних полісахаридів у розчин. Лужні реагенти (гідроксид натрію, калію, кальцію та аміак) діють переважно на лігнін, деполімеризуючи його, розриваючи ефірні зв'язки та вивільняючи целюлозу від лігнін-геміцелюлозного комплексу. Лужне середовище також сприяє набуханням волокон, зниженню кристалічності та підвищенню реакційної здатності целюлози. Застосування лужних розчинів концентрацією близько 10–15%

забезпечує інтенсивну делігніфікацію навіть для жорсткої сировини, такої як шкаралупа волоського горіха чи кісточка абрикоса. Органічні розчинники (етанол, метанол, ацетон), інколи у комбінації з кислотними каталізаторами, використовують у процесах органосольвальної обробки, що поєднує делігніфікацію та часткову деполімеризацію геміцелюлоз.

Біологічна (ферментативна) обробка здійснюється з використанням грибних культур (зокрема білих гнильних грибів, здатних продукувати лігнін-руйнівні ферменти) або комплексів ферментів, целюлаз, ксиланаз, мананаз тощо. Такі методи забезпечують селективний розклад окремих компонентів клітинної стінки у м'яких умовах, без токсичних побічних продуктів. Недоліком є значна тривалість процесів та потреба у суворому контролі умов культивування мікроорганізмів. Утім, ферментативна обробка часто використовується як заключний етап після фізико-хімічної підготовки для максимально ефективного гідролізу целюлози [24].

Попередня обробка відіграє ключову роль у подальшому технологічному процесі, оскільки саме вона визначає ефективність гідролізу, ферментативної переробки, одержання цукрів або вилучення целюлози. Вона зменшує структурну стійкість матеріалу, руйнує клітинні стінки і відкриває внутрішні шари біополімерного комплексу, підвищуючи доступність целюлози. Це дозволяє отримувати більші виходи ферментативно-гідролізованих продуктів, знижує утворення інгібіторів (фенольні та ароматичні сполуки) та спрощує подальші стадії очищення [25].

Особливе значення серед хімічних підходів мають лужна і кислотна обробки, що є найбільш ефективними для жорсткої лігноцелюлозної сировини, до якої належать шкаралупа волоського горіха, кісточка абрикоса, персика, мигдалю та інші ендокарпи. Кислотна обробка руйнує геміцелюлози, частково декристалізує целюлозу, збільшує вихід моносахаридів і покращує дифузю реагентів у товщу волокон. Лужна обробка, навпаки, максимально ефективна для делігніфікації, видалення ацетильних груп та розриву лігнін-

вуглеводних зв'язків, що особливо важливо для твердих кісточкових матеріалів.

У дослідженнях щодо обробки шкаралупи волоського горіха та абрикосових кісточок встановлено, що застосування 15%-го розчину лугу забезпечує значно більший вихід глюкози після ферментативного гідролізу, ніж 1%-ва кислотна обробка або навіть парова експлозія. Це свідчить про те, що делігніфікація є критичною для матеріалів із високим вмістом лігніну та надзвичайно щільною структурою ендокарпу [26].

Комбінація хімічних та фізичних методів дозволяє значно підвищити ефективність попередньої обробки. Ультразвукова активація або дія електричного поля сприяють інтенсифікації дифузії реагентів у структуру сировини, зменшують час обробки та кількість необхідного реагенту. Термічні методи у поєднанні з лужною або кислотною обробкою підвищують ступінь конверсії, оскільки нагріта сировина легше піддається хімічному руйнуванню [27].

У численних дослідженнях підтверджено, що лужна обробка значно очищає структуру від лігніну та підвищує доступність целюлози, тоді як кислотна розкладає переважно геміцелюлозний комплекс і переводить значну частину пентозанів та гексозанів у розчин. Саме тому для отримання максимальної кількості целюлози або цукрів з твердих кісточкових відходів найбільш перспективними є комбіновані схеми обробки, які поєднують механічну деструкцію, термічну дію та хімічну деструкцію полімерів.

Додатково сучасні дослідження свідчать, що ефективність попередньої обробки значною мірою залежить не лише від вибору реагента, а й від особливостей самої сировини. Тверді ендокарпові матеріали шкаралупа горіхів, кісточка абрикоса, персика, сливи мають надзвичайно щільну структуру, високу кристалічність целюлози та значну кількість поперечних зв'язків у лігніні. Це робить їх одним із найскладніших видів рослинної біомаси для переробки, але водночас і одним із найбільш перспективних,

оскільки вони не конкурують із харчовою продукцією й формують великі щорічні обсяги відходів [28].

У зв'язку з цим зростає інтерес до вдосконалених схем попередньої обробки, які поєднують кілька фізико-хімічних підходів. Наприклад, попереднє механічне подрібнення знижує енергетичні бар'єри для гідролізу, тоді як подальша лужна обробка забезпечує глибоку делігніфікацію та вивільнення карбоксильних і фенольних груп. У свою чергу, кислотна гідролізація підсилює деполімеризацію геміцелюлоз й утворення низькомолекулярних цукрів, що важливо для біохімічних процесів. Такі комбіновані методи дозволяють скорочувати час реакції, зменшувати концентрації реагентів і підвищувати загальний вихід цукрів та чистої целюлози.

Перспективними також вважають методи інтенсивного впливу мікрохвильова й ультразвукова активація, попередня набряклість у розчинах карбонатів, використання глибоких евтектичних розчинників та іонних рідин. Вони здатні вибірково руйнувати лігнін або геміцелюлози, мінімізувати утворення інгібіторів і значно покращувати проникність сировини. Такі технології вже демонструють високу ефективність під час обробки твердих шкаралуп, де традиційні способи часто дають недостатній ступінь розкриття структури.

Лужні методи найкраще видаляють лігнін: у дослідженнях вони показали найвищий ступінь видалення лігніну й одночасне наростання виходу целюлози. Кислотні методи в основному знищують геміцелюлозний шар і лише частково розкладають лігнін, тому їх ефективність делігніфікації нижча. Окиснювачі (особливо озон) можуть швидко руйнувати лігнін без розпаду целюлози, але їхня висока вартість та складність генерації обмежують широке застосування [29] .

Алкалій підвищує вихід глюкози: після лужного попереднього оброблення отримують вищий урожай відновлюваних цукрів при ферментативному гідролізі порівняно з кислотною обробкою. Кислотні

методи дають значну розчинність пентоз (ксилан) у вигляді фурфуролу і HMF, що зменшує вихід корисного цукру. Комбіновані схеми (механічне подрібнення + один із хімічних етапів) дозволяють максимізувати врожай цукрів: наприклад, у щільних кісточках попереднє подрібнення плюс NaOH-обробка та наступна нейтралізація давали кращі результати, ніж будь-який окремий метод [29].

Кислотні методи, руйнуючи аморфні компоненти (геміцелюлози), знижують загальну кристалічність залишкової целюлози. Натомість лужні методи через видалення аморфного лігніну і набухання волокон можуть збільшувати відносну кристалічність целюлози. Збільшена кристалічність полегшує механічні процеси, але може стримувати ензимну гідролізу; тому часто потрібне додаткове подрібнення або комбінація методів [29].

Кислотні термічні методи спричиняють найбільше побічних продуктів: фурани, коротколанцюгові карбонові кислоти та фенольні сполуки, що інгібують подальший ферментативний гідроліз і бродіння. Ультракоткороточасна кислотна обробка (наприклад, у вигляді парової вибухової обробки) може дещо пом'якшувати це, але загалом кислотні технології потребують очищення або нейтралізації шламу. Лужні методи утворюють менше інгібіторів (переважно високомолекулярні феноли), які легше видаляються. Окисні методи (особливо озонування) взагалі не утворюють фуранових інгібіторів, але їхня енергомісткість висока [30].

Найменше енергії споживає парова експлозія – вона використовує тепло пара і миттєвий перепад тиску, що дає добрий ефект без складного оснащення. Лужні та органосольвні обробки при кімнатних чи помірних температурах теж відносно енергоефективні, хоча потребують електролізу або підігріву розчинів. Кислотні методи з високими температурами (підігрів до $>180\text{ }^{\circ}\text{C}$) та піроліз є найбільш енергоємними. Сучасні «зелені» методи (DES, IL, плазма) мають потенціал знизити енергоспоживання, але потребують подальших оптимізацій і доказів економічної доцільності [30].

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Характеристика об'єктів дослідження

Об'єктами дослідження у даній роботі є лігноцелюлозні відходи агропромислового комплексу, зокрема шкаралупа волоського горіха та кісточки абрикоса, що належать до типових побічних продуктів переробки плодово-горіхової сировини (рис. 2.1).



а

б

Рисунок 2.1 - Шкаралупи волоського горіха (а) та абрикосових кісточок (б)

Ці матеріали утворюються у значних обсягах як побічні продукти переробної та харчової промисловості. Внаслідок цього вони становлять доступну, маловартісну та екологічно безпечну сировину для подальшого біохімічного або термохімічного перероблення. Високий вміст структурних біополімерів - целюлози, геміцелюлоз і лігніну - робить такі відходи перспективними для отримання цукровмісних гідролізатів, біоетанолу, біокомпозитів, сорбентів та інших цінних продуктів. Водночас характерною особливістю рослинних кісточок та горіхових шкаралуп є їхня надзвичайно щільна анатомічна будова, значний ступінь лігніфікації та низька пористість, що істотно ускладнює доступ реагентів до внутрішніх шарів матеріалу. Саме тому ефективне вилучення біополімерів із таких субстратів потребує

застосування інтенсивних фізико-хімічних методів попередньої обробки, здатних руйнувати міцні лігноцелюлозні структури.

У межах цього дослідження як рослинну сировину використовували подрібнені шкаралупи волоських горіхів (*Juglans regia* L.) та кісточки абрикосів (*Prunus armeniaca*), зібрані на території Одеського регіону України. Вибір саме цих відходів зумовлений їх широкою доступністю, сезонним надлишковим утворенням, високою часткою полімерних компонентів та потенційною цінністю для подальшого біотехнологічного перетворення. Первинне подрібнення рослинних матеріалів здійснювали з використанням лабораторного молоткового млина Retsch SM 100 (Наан, Німеччина), що забезпечувало отримання частинок однорідного розміру, придатних для подальших операцій просіювання та хімічної обробки. Після подрібнення підготовлену сировину зберігали в герметичних поліетиленових пакетах у сухому темному місці для запобігання вторинному зволоженню та мікробіологічному псуванню.

У роботі використовували хімічні реактиви аналітичної чистоти, придбані у фірми «Хімлаборреактив» (Бровари, Україна). Усі розчини готували з використанням дистильованої води згідно зі стандартними лабораторними методиками, що забезпечувало відтворюваність та точність проведених експериментів.

2.2 Попередня обробка рослинної сировини

Перед початком експериментальних досліджень рослинну біомасу піддавали механічному подрібненню на кульовому млині протягом 4 годин з метою зменшення розміру частинок та забезпечення однорідності вихідного матеріалу. Після подрібнення біомасу просіювали на лабораторному наборі сит. Для подальших експериментів відбирали фракцію, що проходила крізь сито з розміром отворів 1 мм та затримувалася на ситі з розміром отворів 0,5 мм. Такий підбір гранулометричного складу забезпечував оптимальне

співвідношення площі поверхні та проникності для реагентів під час проведення попередніх обробок.

Попередню хімічну обробку подрібненого рослинного матеріалу 1% розчином сульфатної кислоти (H_2SO_4) та 15% розчином гідроксиду натрію (NaOH) здійснювали в лабораторних умовах за температури 180 °C. Тривалість нагрівання варіювали в межах 20–60 хв. Завантаження біомаси в кожний сталевий автоклав здійснювали у визначеній кількості, після чого додавали необхідний об'єм відповідного розчину. Автоклави встановлювали у гліцеринову баню та нагрівали до заданої температури, підтримуючи її протягом усього періоду обробки, що забезпечувало рівномірний тепломасообмін та стабільні реакційні умови.

Після завершення кислотної або лужної обробки нагрівання припиняли, а автоклави охолоджували під потоком проточної води до кімнатної температури з метою запобігання подальшим термохімічним змінам структури біомаси. Одержаний твердий рослинний залишок (субстрат) відфільтровували на вакуумній фільтр-системі та ретельно промивали дистильованою водою для повного видалення залишкових реагентів та розчинених продуктів руйнування біополімерів. Після промивання субстрат висушували на повітрі до досягнення вмісту вологи близько 7%, що забезпечувало стабільність матеріалу під час подальших аналітичних процедур та експериментальних досліджень.

2.3 Ферментативний гідроліз

Попередньо оброблені рослинні речовини використовували як субстрати для подальшого ферментативного гідролізу з метою оцінювання здатності отриманих матеріалів до біоконверсії та визначення виходу редукуючих цукрів [31]. Підготовлені лігноцелюлозні субстрати гідролізували з використанням промислового целюлазного ферментного комплексу Cellic STec2, який містить широкий спектр ферментативних активностей,

необхідних для ефективного руйнування целюлозних фібрил та вивільнення моносахаридів. Завантаження ферменту становило 15 FPU на 1 г абсолютно сухого субстрату, що відповідає рекомендованим технологічним умовам гідролізу для лігноцелюлозних матеріалів із підвищеною щільністю структури. Для забезпечення достатнього рівня β -глюкозидазної активності, необхідної для конверсії утворюваних олігосахаридів у моносахариди та запобігання целюлозній інгібіції, до реакційної суміші додатково вносили β -глюканазу. Реакційне середовище готували на основі 0,05 М цитратно-натрієвого буфера, доводячи рН до 4,8, що є оптимальним значенням для дії більшості целюлазних комплексів. Після коригування рН ферменти додавали до лігноцелюлозного субстрату, попередньо нормалізованого до концентрації 5% сухої речовини.

Гідроліз проводили у колбах об'ємом 100 мл із робочим об'ємом реакційної суміші 25 мл. Колби витримували за температури 50 °C протягом 72 годин у термостатованому орбітальному шейкері Certomat-R (B-Braun, Геттінген, Німеччина) зі швидкістю перемішування 150 об/хв, що забезпечувало рівномірний масообмін і запобігало седиментації частинок субстрату.

Для контролю динаміки ферментативного розщеплення з реакційної суміші відбирали проби об'ємом 1 мл через 24, 48 та 72 год та використовували їх для визначення концентрацій основних продуктів гідролізу - глюкози та ксилози - методом високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ) на хроматографічній системі Agilent Technologies (Пало-Альто, Каліфорнія, США).

2.4 Характеристика одержаних продуктів

Хімічний склад рослинної сировини визначали за стандартною методикою, яка передбачає послідовне встановлення вмісту основних структурних компонентів лігноцелюлозного матеріалу - целюлози,

геміцелюлоз, лігніну та супутніх екстрактивних речовин. Для кількісного визначення вмісту структурних вуглеводів проводили кислотний гідроліз з використанням 72% розчину сірчаної кислоти. Отримані гідролізати аналізували методом рідинної хроматографії для оцінювання концентрацій моносахаридів, що утворилися внаслідок руйнування полісахаридних структур. Такий підхід дозволяв забезпечити високу точність визначення цукрового складу, необхідного для подальшого розрахунку виходів продуктів біоконверсії.

Вихід твердої фракції (субстрату) після проведення попередньої хімічної обробки визначали гравіметричним методом шляхом зважування висушених зразків і порівняння їх маси з масою вихідної сировини. Рідку фазу, одержану після фільтрування через нейлонові мембрани з розміром пор 0,45 мкм, піддавали хроматографічному аналізу. Для визначення вмісту моносахаридів - глюкози, ксилози, маннози, галактози та арабінози - а також інгібіторів, що утворюються внаслідок термогідролітичного розкладу біополімерів (зокрема оцтової та мурашиної кислот, фурфуролу й гідроксиметилфурфуролу (ГМФ)), використовували високоефективну рідинну хроматографію (ВЕРХ). Аналіз проводили на системі Agilent Technologies 1200 Series (Santa Clara, США), оснащений колонкою ICsep ICE-COREGEL 87H3. Температуру колонки підтримували на рівні 65 °С. Як рухому фазу застосовували 5 мМ розчин сульфатної кислоти з витратою 0,6 мл/хв, що забезпечувало ефективне розділення цукрів та побічних продуктів гідролізу.

Усі експерименти та аналітичні визначення виконували у трикратній повторюваності з метою підвищення надійності результатів і контролю відтворюваності методик. Для всіх отриманих даних відносне стандартне відхилення не перевищувало 5%, що свідчить про достатню точність проведених вимірювань і коректність використаних експериментальних підходів.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Дослідження хімічного складу шкаралуп волоського горіха та кісточок абрикоса

Хімічний склад вихідних шкаралуп абрикосових кісточок та шкаралупи волоських горіхів наведено в таблиці 3.1. Отримані результати свідчать про суттєві відмінності у вмісті основних структурних компонентів цих двох типів лігноцелюлозної сировини. Аналіз складу шкаралупи абрикосових кісточок показав, що вони характеризуються нижчим вмістом екстрактивних речовин порівняно зі шкаралупою волоських горіхів. З технологічної точки зору це є позитивним чинником, оскільки надлишок екстрактивних речовин може ускладнювати процес гідролізу та знижувати ефективність подальшої біоконверсії.

Таблиця 3.1 - Хімічний склад шкаралупи абрикосових кісточок та шкаралупи волоського горіха (% від сухої маси)

Компоненти	Шкаралупа абрикосових кісточок	Шкаралупа волоського горіха
Екстрактивні речовини	$9,97 \pm 0,51$	$11,41 \pm 2,23$
Целюлоза	$35,01 \pm 0,42$	$24,19 \pm 0,68$
Геміцелюлози	$10,77 \pm 0,14$	$25,68 \pm 1,70$
Ксилан	$8,33 \pm 0,09$	$21,35 \pm 1,83$
Галактан	$1,28 \pm 0,05$	$2,78 \pm 0,07$
Арабінан	$1,16 \pm 0,02$	$1,55 \pm 0,01$
Манан	-	-
Лігнін	$44,55 \pm 1,05$	$44,63 \pm 1,01$
Зола	$0,23 \pm 0,01$	$0,37 \pm 0,01$
Ацетильні групи	$0,85 \pm 0,02$	$3,87 \pm 0,09$
Оцтова кислота	$1,21 \pm 0,03$	$5,53 \pm 0,12$

Вміст целюлози у шкаралупах абрикосових кісточок вищий, ніж у шкаралупі волоських горіхів, що свідчить про більшу частку структурних

полісахаридів, придатних до ферментативного або хімічного розщеплення. Натомість шкаралупа волоських горіхів містить значно більшу кількість геміцелюлоз. Значення вмісту целюлози в шкаралупах абрикосових кісточок узгоджується з літературними даними, наведеними іншими дослідниками, які вказують на рівень 34,31% [32], що підтверджує достовірність проведених вимірювань.

Більшість глюкози в досліджуваних зразках пов'язана з целюлозою, тоді як ксилоза, що є основним моносахаридним компонентом геміцелюлоз, продемонструвала найвищі концентрації серед низькомолекулярних полісахаридів - 9,41% для шкаралупи абрикосових кісточок та 24,13% для шкаралупи волоських горіхів. Це свідчить про значні відмінності у вуглеводному профілі матеріалів і може впливати на вибір оптимальних умов попередньої обробки та гідролізу.

Обидва види рослинних матеріалів характеризуються високим вмістом лігніну (44,5 та 44,6%), що властиво міцним кісточковим оболонкам та пояснює їхню високу механічну міцність і стійкість до хімічного руйнування. Така структура притаманна сильно здерев'янілим рослинним тканинам і визначає складність реакцій їхнього руйнування без попередньої інтенсивної обробки.

Вміст золи в обох зразках не перевищує 0,5%, що свідчить про низьку концентрацію неорганічних домішок і дозволяє класифікувати ці матеріали як високоякісну біосировину для подальших біотехнологічних процесів. Водночас кількість ацетильних груп у шкаралупі волоських горіхів виявилася вищою, ніж у шкаралупі абрикосових кісточок, що може бути важливим фактором при оцінюванні інгібіторної активності гідролізатів.

Порівняння отриманих результатів із даними, наведеними Кейросом та ін. [33], свідчить, що вміст цукрів у шкаралупі волоських горіхів є загалом подібним, проте рівні інших компонентів демонструють певні відхилення. Це пояснюється природною варіабельністю рослинних матеріалів. У свою чергу, порівняння з даними інших дослідників [32] показує суттєву різницю у вмісті

основних структурних складових, що цілком закономірно, адже хімічний склад рослинної сировини зазнає впливу цілого комплексу зовнішніх та біологічних чинників - сорту рослини, умов вирощування, кліматичних особливостей, типу ґрунту, стадії стиглості, способу збору та зберігання.

Таким чином, отримані результати підтверджують природну неоднорідність лігноцелюлозних відходів плодово-горіхової промисловості та підкреслюють важливість індивідуального підходу до вибору параметрів попередньої обробки для кожного типу біомаси.

3.2 Порівняльна оцінка впливу кислотної та лужної обробки на властивості субстрату

Хімічна структура має визначальне значення у поведінці рослинної біомаси під час фізичної, хімічної чи біохімічної обробки. Геміцелюлози відіграють важливу роль у формуванні структурної стійкості лігноцелюлозної біомаси, оскільки вони утворюють аморфну матрицю, що оточує целюлозні мікро- та нанофібрили, виконуючи своєрідну захисну функцію. Завдяки цьому геміцелюлози обмежують доступ гідролітичних ферментів до целюлози та захищають її від ферментативного руйнування, що зумовлює низьку біодоступність целюлози у нативній біомасі [32]. Саме тому руйнування або часткове видалення геміцелюлозного шару є одним із ключових завдань стадії попередньої обробки.

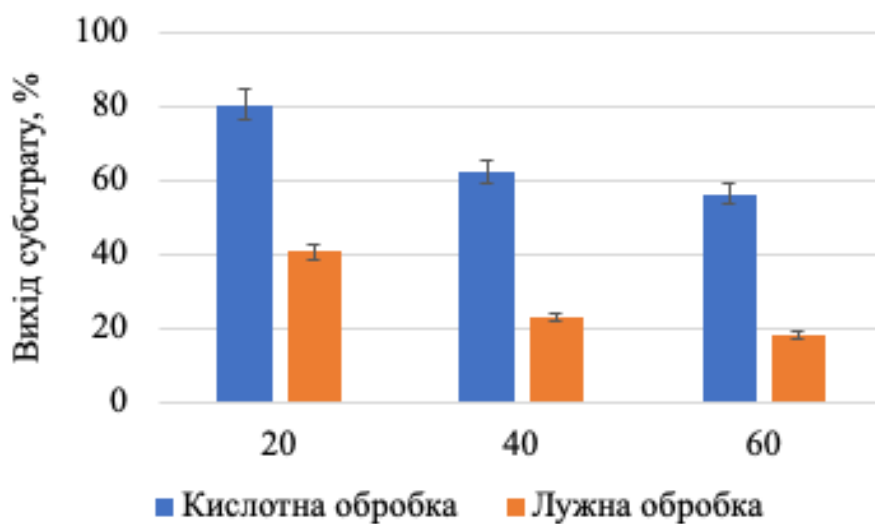
Кислотна попередня обробка, зокрема з використанням розведеної сірчаної кислоти, вважається ефективним методом для гідролітичного розщеплення та розчинення низькомолекулярних полісахаридів, передусім геміцелюлоз. За підвищених температур такі умови сприяють деполімеризації геміцелюлоз до оліго- та моносахаридів, що переходять у рідку фазу, водночас структура целюлози залишається відносно стабільною. Однак застосування кислотної обробки потребує ретельного контролю параметрів процесу, оскільки надмірно жорсткі умови можуть призводити до утворення інгібіторів ферментативного гідролізу та подальшої ферментації.

Лужна попередня обробка, навпаки, є однією з найбільш привабливих методик підготовки лігноцелюлозної біомаси до ферментативного гідролізу завдяки своїй високій селективності щодо видалення лігніну [32]. Під дією лугів, зокрема гідроксиду натрію, відбувається розрив естерних та ефірних зв'язків між лігніном і вуглеводною частиною біомаси, що сприяє розчиненню лігніну та набуванню целюлозних волокон. У результаті зростає питома поверхня та пористість твердого залишку, що істотно підвищує доступність целюлози для ферментів на наступних стадіях переробки.

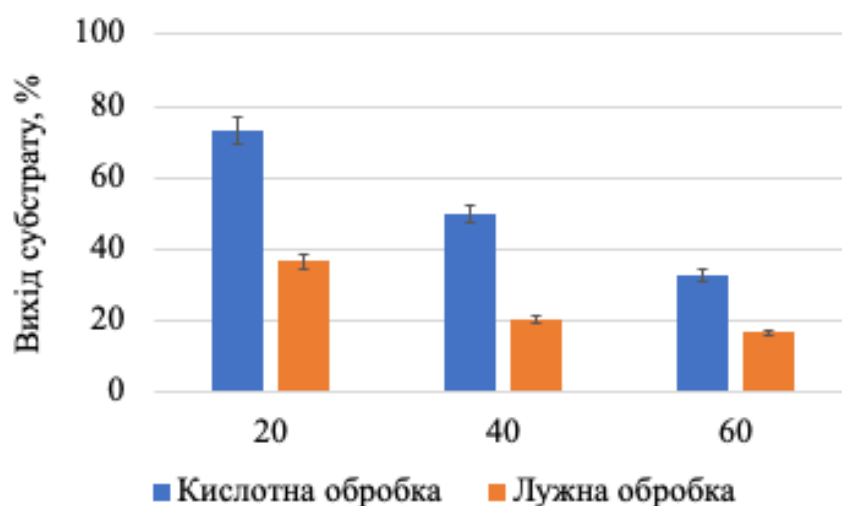
На рис. 3.1 наведено вплив тривалості кислотної та лужної попередньої обробки розведеними розчинами за температури 180 °C на вихід субстрату з шкаралуп волоського горіху та кісточок абрикосу. Аналіз результатів свідчить про чітку залежність ефективності обробки як від типу реагенту, так і від часу впливу.

Для шкаралуп волоського горіху спостерігається поступове зниження досліджуваного показника зі збільшенням тривалості обробки як у кислотному, так і в лужному середовищі. При кислотній обробці значення зменшуються з 80,6% за 20 хв до 56,4% за 60 хв, що вказує на інтенсивне видалення або руйнування полісахаридних компонентів, передусім геміцелюлоз. Лужна обробка перебігає значно інтенсивніше: вже за 20 хв значення становить 40,9%, а за 60 хв знижується до 18,6%. Це підтверджує високу ефективність лужних реагентів щодо делігніфікації та руйнування лігнін-вуглеводних зв'язків у структурі шкаралупи.

Аналогічна тенденція простежується і для шкаралуп кісточок абрикосу, однак абсолютні значення є дещо нижчими, особливо за тривалішої обробки. За кислотної попередньої обробки показник зменшується з 73,4% до 32,5%, що свідчить про істотніші структурні зміни порівняно зі шкаралупою волоського горіху. Лужна обробка також демонструє значно ефективнішою: значення знижуються з 36,5% до 16,7% при збільшенні часу обробки з 20 до 60 хв.



а



б

Рисунок 3.1 - Вплив тривалості кислотної та лужної попередньої обробки за температури 180 °С на вихід субстрату з шкаралуп волоського горіху та кісточок абрикосу.

Порівняльний аналіз двох видів сировини показує, що шкаралупи кісточок абрикосу загалом є більш чутливими до попередньої обробки, особливо кислотної, ніж шкаралупи волоського горіху. Це може бути зумовлено відмінностями у хімічному складі, зокрема співвідношенні лігніну, целюлози та геміцелюлоз, а також у щільності та морфології структури біомаси.

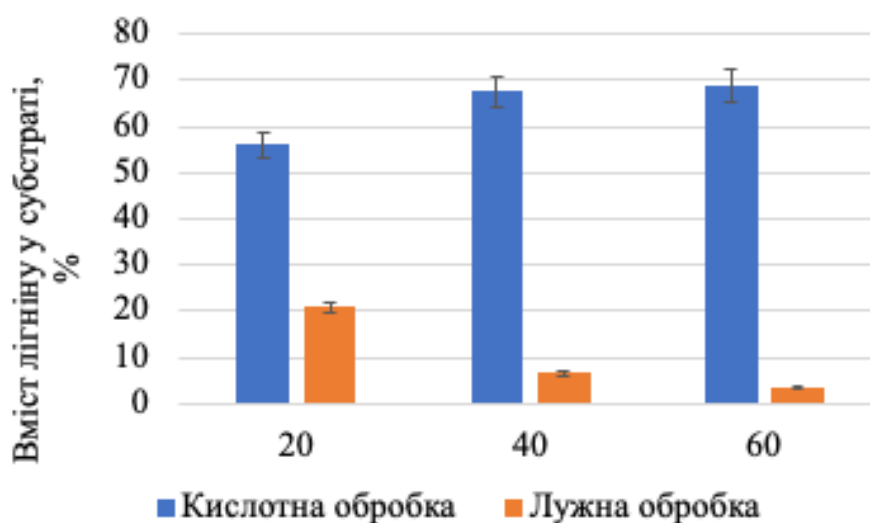
У цілому отримані результати підтверджують, що збільшення тривалості обробки за температури 180 °C призводить до зростання ступеня деструкції лігноцелюлозної матриці для обох типів сировини. Лужна попередня обробка виявляється ефективнішою за кислотну щодо зниження стійкості біомаси, тоді як кислотна обробка може бути доцільною для селективного видалення геміцелюлоз. Це свідчить про можливість цілеспрямованого вибору умов попередньої обробки залежно від типу рослинної сировини та поставлених технологічних завдань.

На рис. 3.1 наведено вплив тривалості кислотної та лужної попередньої обробки розведеними розчинами за температури 180 °C на вміст залишкового лігніну у субстратах з шкаралуп волоського горіху та кісточок абрикосу. Отримані результати демонструють принципово різну дію кислотного й лужного середовищ на лігнінову складову біомаси, а також чітку залежність від тривалості обробки.

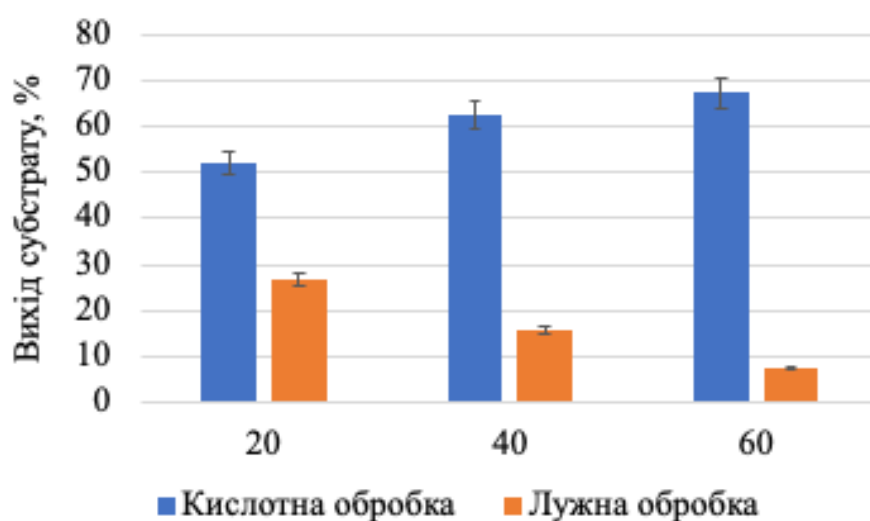
Для шкаралуп волоського горіху кислотна обробка не лише не сприяє видаленню лігніну, але й призводить до зростання його відносного вмісту в твердому залишку з 56,1 % до 68,9 %. Така тенденція пояснюється селективним гідролізом геміцелюлоз і частковим руйнуванням аморфних вуглеводів, унаслідок чого лігнін концентрується в твердій фазі. Натомість лужна обробка шкаралуп волоського горіху є надзвичайно ефективною щодо делігніфікації. Вміст залишкового лігніну різко зменшується зі збільшенням тривалості процесу з 20,8 % до лише 3,41 %. Це свідчить про інтенсивне руйнування етерних і естерних зв'язків лігніну з вуглеводною матрицею та його переходу в рідку фазу, що підтверджує високу селективність лужної попередньої обробки.

Подібні закономірності спостерігаються і для шкаралуп кісточок абрикосу. За кислотної обробки вміст залишкового лігніну зростає з 52,1 % до 67,3 % при збільшенні тривалості процесу з 20 до 60 хв, що також вказує на концентрування лігніну внаслідок видалення вуглеводної частини біомаси. Водночас лужна обробка забезпечує суттєве зниження вмісту лігніну - з 26,8%

після 20 хв до 7,4 % після 60 хв, хоча ступінь делігніфікації є дещо нижчим порівняно зі шкаралупою волоського горіху.



а



б

Рисунок 3.2 - Вплив тривалості кислотної та лужної попередньої обробки за температури 180 °С на вміст лігніну в субстраті з шкаралуп волоського горіху та кісточок абрикосу.

Порівняльний аналіз двох видів сировини показує, що шкаралупи волоського горіху є більш чутливими до лужної делігніфікації, тоді як шкаралупи кісточок абрикосу характеризуються дещо вищою стійкістю

лігнінової матриці. Загалом отримані дані підтверджують, що за температури 180 °С кислотна попередня обробка є неефективною для видалення лігніну та призводить до його накопичення у твердому залишку, тоді як лужна обробка є ключовим і найбільш результативним методом зниження вмісту залишкового лігніну в субстраті, що є критично важливим для підвищення доступності целюлози на наступних стадіях ферментативного гідролізу.

Загалом, перевищення тривалості обробки більше 40 хв є недоцільним, оскільки це призводить до значного зниження виходу рослинних продуктів. Субстрати, одержані за тривалості 40 хв, були викорисатні для детального вивчення композиційного складу полісахаридної складової. Результати досліджень наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Композиційний склад полісахаридної складової субстратів з шкаралуп волоського горіха та кісточок абрикосу

Матеріал	Вміст цукрів (%)					
	Глюкан	Ксилан	Галактан	Арабінан	Маннан	Метод обробки
Кислотна попередня обробка						
Кісточки абрикоса	27,43 ± 0,29	-	-	-	-	Кислотна обробка
Шкаралупа волоського горіха	30,30 ± 0,64	0,90 ± 0,06	-	-	-	Кислотна обробка
Лужна попередня обробка						
Кісточки абрикоса	75,58 ± 1,14	3,59 ± 0,28	-	-	-	Лужна обробка
Шкаралупа волоського горіха	73,38 ± 1,58	5,57 ± 0,09	-	-	-	Лужна обробка

Аналіз субстрату після лужної попередньої обробки засвідчив, що отриманий субстрат характеризується дуже високим вмістом целюлозної

фракції. З урахуванням визначеного вмісту глюкози частка целюлози в таких зразках перевищувала 70 %, що свідчить про ефективне видалення лігніну та значної частини геміцелюлоз. За рахунок цього целюлозні волокна стають більш доступними для дії целюлолітичних ферментів, а отже, можна очікувати, що саме субстрат після лужної попередньої обробки забезпечать найвищий вихід глюкози під час подальшого ферментативного гідролізу.

3.3 Характеристика відпрацьованих розчинів кислотної обробки

Відібраний відпрацьований розчин після кислотної обробки протягом 40 хв детально досліджували на вміст продуктів деструкції методом рідинної хроматографії. Результати дослідження наведено в табл. 3.3. Відпрацьовані розчини після попередньої лужної обробки не аналізували через велику кількість розчинних та зважених речовин, які не можна було вилучити центрифугуванням та мембранною фільтрацією.

Таблиця 3.3 - Характеристика відпрацьованих розчинів після кислотної обробки шкаралуп волоського горіха та кісточок абрикосу

Показник	Кислотна попередня обробка	
	Шкаралупа кісточок абрикосу	Шкаралупа волоського горіха
Вихід геміцелюлозних цукрів (%)	4,21	10,91
Вихід глюкози (%)	37,16	35,67
глюкоза (г/л)	27,86 ± 0,08	18,98 ± 0,07
ксилоза	1,35 ± 0,02	6,33 ± 0,02
галактоза	0,17 ± 0,00	1,55 ± 0,01
арабіноза	-	0,19 ± 0,00
маноза	0,17 ± 0,00	-

Продовження таблиці 3.3

мурашина кислота	$2,45 \pm 0,01$	$1,96 \pm 0,02$
оцтова кислота	$2,91 \pm 0,01$	$9,92 \pm 0,03$
фурфурол	$3,74 \pm 0,02$	$9,74 \pm 0,03$
гідроксиметилфурфурол	$1,47 \pm 0,01$	$1,06 \pm 0,01$
левулінова кислота	$3,31 \pm 0,02$	$2,05 \pm 0,02$

Як свідчать отримані результати, після кислотної попередньої обробки в рідкій фазі зафіксовано підвищені концентрації глюкози, що вказує на часткову деструкцію целюлозної фракції. Це означає, що за температури 180°C кислотне середовище сприяє не лише гідролізу геміцелюлоз, але й ініціює розщеплення целюлозних ланцюгів із переходом продуктів гідролізу в рідку фазу. Водночас кількість геміцелюлозних цукрів, відновлених у вигляді моносахаридів після кислотної обробки обох видів досліджуваної сировини, була порівняно невеликою.

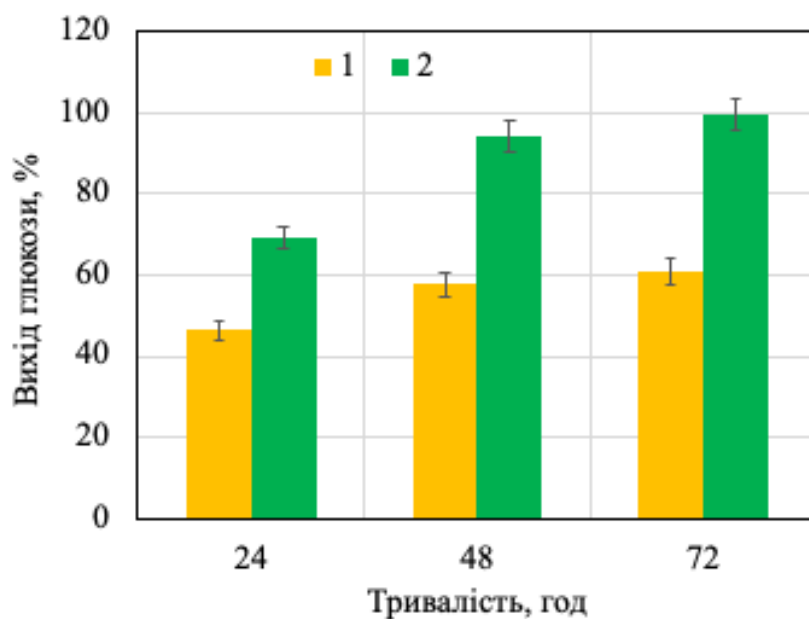
У процесі кислотного гідролізу відбувалося також розщеплення ацетильних груп, притаманних геміцелюлозам, що зумовило утворення оцтової кислоти в рідкій фазі. Крім того, подальша деградація моносахаридів за високих температур і в кислому середовищі призвела до формування низки побічних продуктів, зокрема органічних кислот (мурашиної та левулінової), а також фурфуролу та гідроксиметилфурфуролу, які відомі як інгібітори ферментативного гідролізу та мікробної ферментації. Вміст ксилану - основної структурної складової геміцелюлоз - є одним із ключових індикаторів ефективності кислотної попередньої обробки. Як показано в таблиці 3.3, після кислотного гідролізу ксилан практично повністю був видалений з обох видів сировини, що підтверджує глибоку деструкцію геміцелюлозної фракції.

3.4 Біохімічна конверсія полісахаридної складової

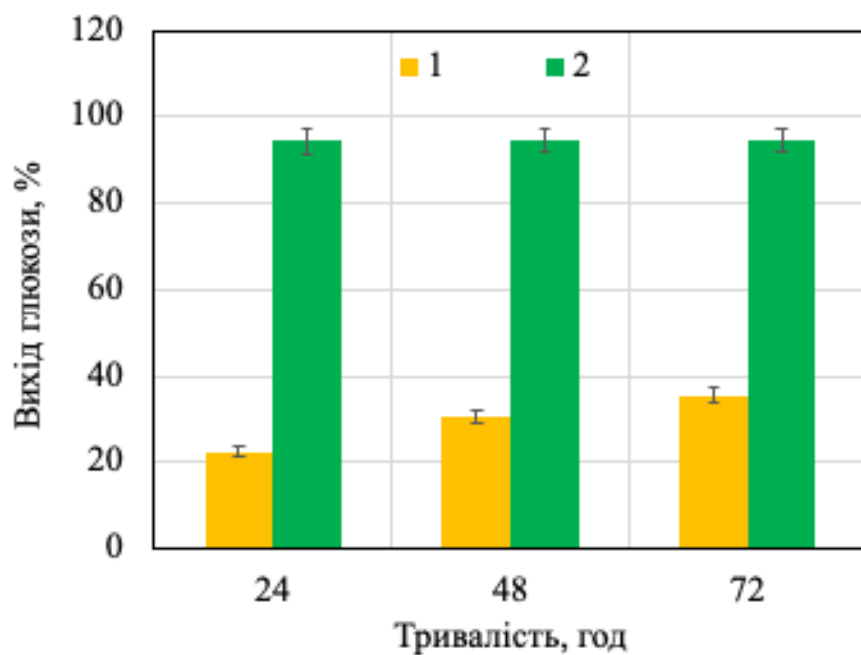
Одержані субстрати піддавали ферментативному гідролізу із використанням промислового целюлазного комплексу Cellic CTec2. Було досліджено вплив тривалості процесу на ефективність перетворення целюлози (рис. 3.3). Отримані результати загалом підтверджують очікувану тенденцію: зі збільшенням часу гідролізу ступінь перетворення целюлози зростав майже для всіх досліджуваних зразків. Це свідчить про поступове розщеплення целюлозних ланцюгів і накопичення глюкози в гідролізаті в міру тривалого контакту субстрату з ферментами.

Виняток становив твердий залишок, отриманий після лужної попередньої обробки шкаралупи волоського горіха. Для цього зразка максимальна ефективність ферментативного гідролізу досягалася вже протягом перших 24 годин процесу, тоді як подальше збільшення тривалості практично не впливало на вихід глюкози. Така поведінка може свідчити про високу доступність целюлози після лужної обробки, коли основні структурні бар'єри були усунуті на ранніх стадіях гідролізу.

Найвищі показники ефективності були досягнуті для субстраут після лужної попередньої обробки сировини. У цьому випадку максимальний вихід глюкози під час ферментативного гідролізу становив 99,7 % для шкаралупи кісточок абрикоса та 94,6 % для шкаралупи волоських горіхів. Такі значення практично відповідають повному перетворенню доступної целюлози, що підтверджує високу ефективність лужної обробки у підготовці субстрату до ферментативного розщеплення.



а



б

Рисунок 3.3 - Вплив тривалості процесу на вихід глюкози під час ферментативного гідролізу субстрату з шкаралуп абрикосових кісточок (а) та шкаралупи волоських горіхів (б): 1 - після попередньої обробки кислотою; 2 - після попередньої обробки лугом.

Ймовірно, саме інтенсивне видалення геміцелюлози та лігніну під час кислотної та особливо лужної попередньої обробки сприяло формуванню

додаткових пор, тріщин і реакційноздатних ділянок у структурі біомаси. Це значно підвищувало доступність целюлозних волокон для дії целюлолітичних ферментів та покращувало кінетику гідролізу.

На рис. 3.4 наведень ІЧ-спектри для вихідних, попередньо оброблених та гідролізованих шкаралуп абрикосових кісточок та шкаралупи волоських горіхів. Піки $3600\text{--}3000\text{ см}^{-1}$ присутні у всіх спектрах і зумовлені валентними коливаннями ОН. Піки між $2945\text{--}2855\text{ см}^{-1}$ відносяться до валентних коливань С-Н у всіх досліджуваних матеріалах. Піки при $1648, 1431, 1417, 1375, 1165, 1060$ та 897 см^{-1} пов'язані з полісахаридами. Смуги при $1605, 1509$ та 1425 см^{-1} відповідають коливанням ароматичного скелета лігніну. Субстрати, отримані після попередньої лужної обробки шкаралуп, характеризуються відсутністю смуг при 1509 та 1425 см^{-1} через делігніфікацію. Смуги при 1509 та 1425 см^{-1} , пов'язані з лігніном, стають інтенсивнішими у зразку, отриманому після ферментативного гідролізу твердих речовин після попередньої обробки кислотою, і вони також показують, що в цих зразках більше лігніну. Пік при 1249 см^{-1} пов'язаний зі зв'язками С=С в ароматичних кільцях лігніну та валентними зв'язками С-О-С у геміцелюлозах. Цей пік менш виражений у попередньо оброблених твердих речовинах, що вказує на видалення геміцелюлози. Основна відмінність між ІЧ-спектрами вихідних матеріалів, попередньо оброблених твердих речовин та твердих речовин після гідролізу полягає у збільшенні інтенсивності смуг, пов'язаних з лігніном (1509 та 1425 см^{-1}), що підтверджує, що отримані тверді речовини містять велику кількість лігніну.

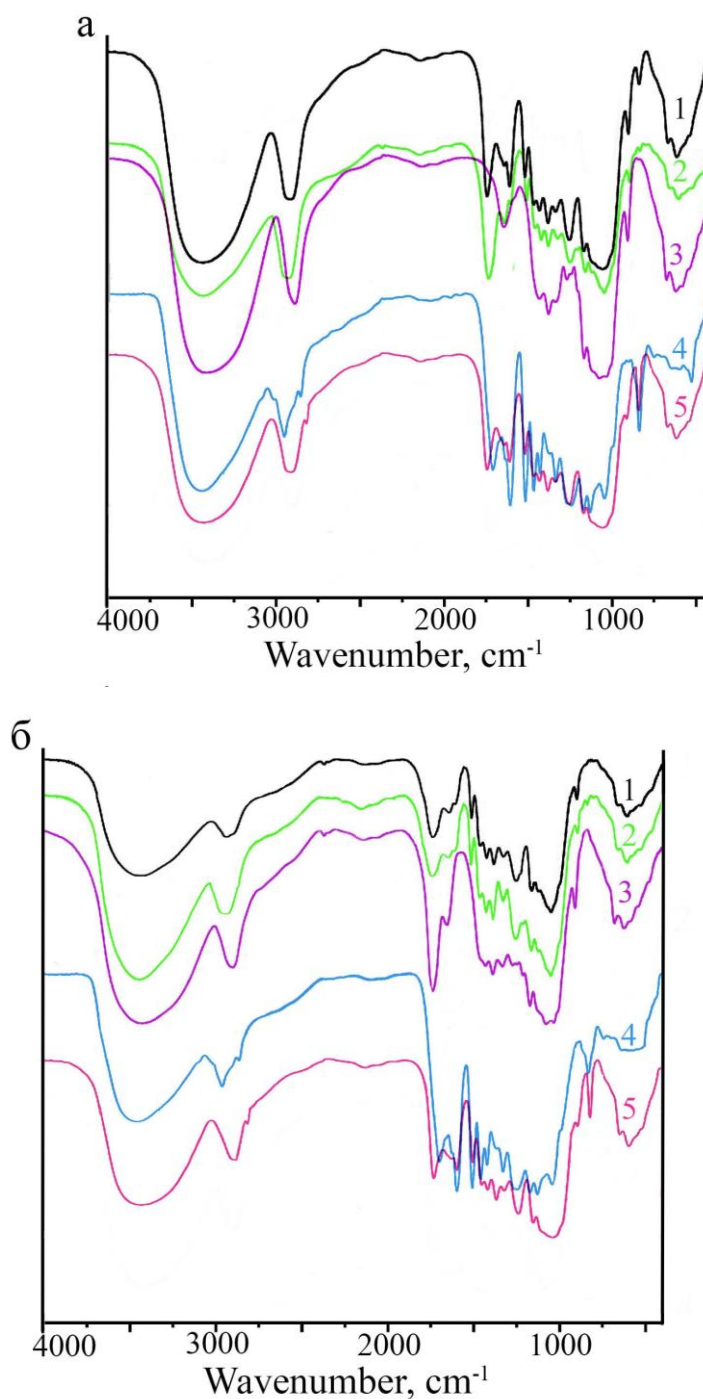


Рисунок 3.4 - ІЧ-спектри для вихідних, попередньо оброблених та гідролізованих шкаралуп абрикосових кісточок (а) та шкаралупи волоських горіхів (б): 1 - вихідні матеріали; 2–3 - субстрати після попередньої кислотної та лужної обробка відповідно; 5–7 - відповідні тверді залишки після ферментативного гідролізу з промисловим целюлазним ферментним комплексом Cellic CTec2.

3.5 Баланс сировини

Для кожного матеріалу та типу попередньої обробки було побудовано масовий баланс, який показано на рисунках 3.5 та 3.6. У всіх випадках результати наведено для 100 г сировини для зручності порівняння. Як видно, у кожній схемі було отримано 62,5 г та 23,2 г субстрату зі шкаралупи кісточок абрикоса та 49,7 г та 20,5 г зі шкаралупи волоських горіхів. Під час попередньої кислотної обробки відбувався переважно гідроліз полісахаридів (10,7% у вихідних шкаралупах кісточок абрикоса та 25,7% у шкаралупах волоських горіхів), а також видалення екстрактивних речовин. Під час попередньої лужної обробки відбувалося переважно окислення та видалення лігніну (майже 44,6% у вихідному матеріалі). Обидва процеси призвели до нижчого виходу субстрату порівняно з кислотною обробкою.

Друга схема (рис. 3.6) характеризується отриманням рідкої фази з найбільшою кількістю розчинених речовин. У першій схемі (рис. 3.5) повний гідроліз геміцелюлози був досягнутий для шкаралупи кісточок абрикоса, але для шкаралупи волоських горіхів отриманий субстрат містить невелику кількість ксилози. Водночас обидва продукти збагачені лігніном. У другій схемі кількість лігніну була значно зменшена для обох типів біомаси. Те саме сталося і з кількістю геміцелюлози.

Попередньо оброблені тверді речовини були піддані ферментативному гідролізу за допомогою промислового целюлазного ферментного комплексу Cellic CTec2 у присутності β -глюканази. На другому етапі було отримано 11,4 г та 5,8 г глюкози після попередньої обробки кислотою, 19,2 г та 15,6 г глюкози після попередньої обробки лужною обробкою. Повного перетворення целюлози на глюкозу не було досягнуто, але лужна попередня обробка 15% NaOH була найоптимальнішим типом для попередньої обробки обох видів сировини, що призвело до найвищого виходу глюкози.

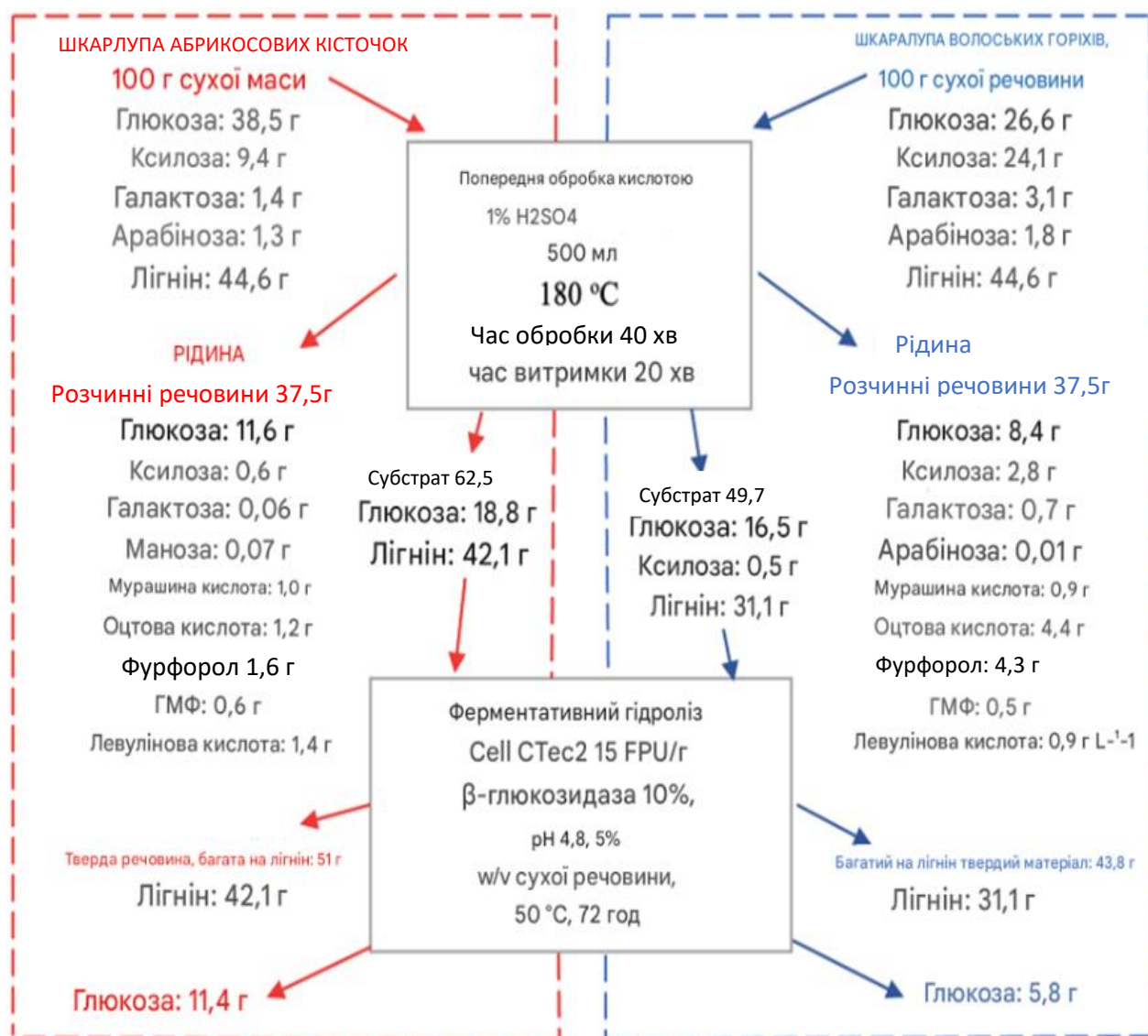


Рисунок 3.5 - Масовий баланс для попередньої обробки кислотою та ферментативного гідролізу шкаралупи абрикосових кісточок та шкаралупи волоських горіхів. Шкарлупа абрикосових кісточок розрахунок на 100 г сухої ваги

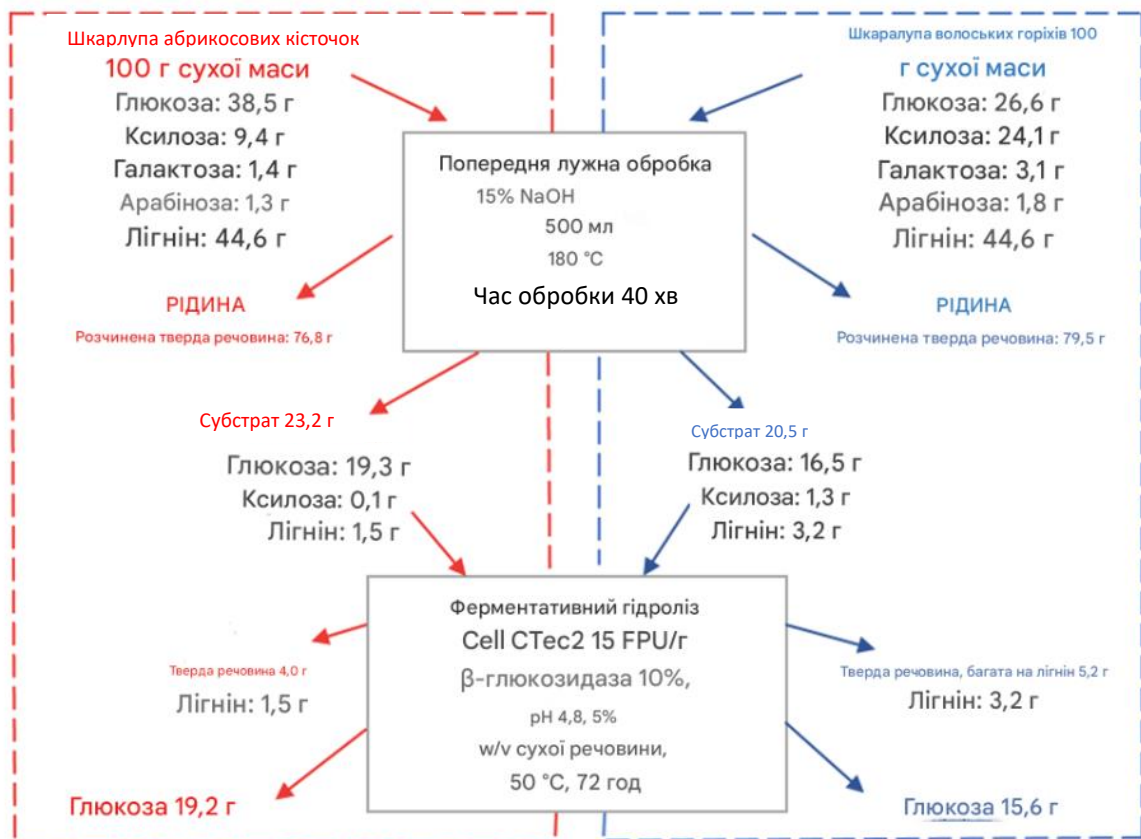


Рисунок 3.6 - Масовий баланс для лужної попередньої обробки та ферментативного гідролізу шкаралупи кісточок абрикоса та шкаралупи волоських горіхів

4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ

Ідея стартап-проєкту ґрунтується на комерціалізації технології переробки шкаралупи волоського горіха та кісточок абрикоса після кислотної та лужної обробки, з метою підвищення ефективності їх подальшої переробки на біопаливо. Об'єкти дослідження – це шкаралупа волоського горіха та кісточки абрикоса які є лігноцелюлозними відходами агропромислового комплексу і які зазвичай утилізуються спалюванням або захороненням. Попередня хімічна обробка (кислотна та лужна) руйнує їх щільну структуру та підвищує реакційну здатність для подальшого отримання цінних продуктів.

Комерціалізація цієї технології здійснюватиметься за моделлю поетапного виходу на ринок. На першому етапі передбачається запуск малотоннажного виробництва попередньо хімічно обробленої лігноцелюлозної сировини з подальшим її продажем як напівпродукту підприємствам хімічної та фармацевтичної промисловості. Це дозволить швидко підтвердити якість продукту у промислових умовах та отримати перші контракти.

Другим напрямом комерціалізації стане надання послуг хімічної попередньої обробки агровідходів для сторонніх компаній. Такий сервіс дозволить використовувати технологію підприємствам, які не мають власних виробничих потужностей, але зацікавлені у підвищенні ефективності переробки своєї сировини.

Третій напрям це трансфер технології шляхом укладання ліцензійних угод з великими агропромисловими холдингами та виробниками біопалива, які прагнуть інтегрувати у власні виробничі цикли вискоєфективні та екологічні методи переробки відходів. Передача технології включатиме інженерний супровід, адаптацію технологічних режимів та консалтинг.

У перспективі, після підтвердження економічної доцільності та збільшення обсягів сировини, можливим буде масштабування до промислового виробництва спеціалізованої технічної целюлози для потреб

хімічної промисловості, виробників композитів та підприємств, що виготовляють високомаржинальні целюлозні продукти. Такий багаторівневий підхід дозволяє поєднати гнучкість, швидкий вихід на ринок та високий потенціал масштабування.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Технологія комплексного хімічного (лужного та/або кислотного) підготовки шкаралупи волоського горіха та кісточок абрикоса.	1. Виробництво біопалива (рідкого або твердого).	Для виробників біопалива: * Підвищення ефективності переробки за рахунок кращого руйнування структури. * Збільшення виходу цукрів або продуктів для біоконверсії.
Продукт: Попередньо оброблена лігноцелюлозна сировина (твердий залишок) з підвищеною доступністю полісахаридів.	2. Виробництво сорбентів та активованого вугілля.	Для підприємств: * Ресурсоефективні та чисті технології. * Переробка великих обсягів відходів у корисний продукт. * Підтримка принципів циркулярної економіки та сталого розвитку.

Назва стартап-проєкту буде “Одержання високочистої технічної целюлози з лігноцелюлозної сировини (шкаралупи волоського горіха та кісточок абрикоса) за технологією стартап-проєкту NutraCell. Логотип стартап-проєкту подано на рисунку 4.1”



Рисунок 4.1 - Логотип стартап-проєкту

Ключова ідея стартап-проєкту полягає у комерціалізації високотехнологічного методу попередньої хімічної обробки (лужної / кислотної) лігноцелюлозних відходів агропромисловості (шкаралупи волоського горіха та кісточок абрикоса).

Цей метод дозволяє руйнувати щільну і стійку структуру сировини, значно підвищуючи її реакційну здатність і, як наслідок, збільшуючи ефективність та вихід цінних кінцевих продуктів:

1. Біопаливо (рідке та тверде)
2. Сорбенти/Активоване вугілля
3. Технічна целюлоза

Проєкт вирішує дві основні проблеми: ефективну утилізацію великих обсягів промислових відходів та підвищення економічної ефективності процесів переробки вторинної сировини [34].

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Мій проєкт	Конку-рент 1 (Понінківська КПФ)	Конку-рент 2 (Обухівський ККПК)	Конку-рент 3 (Каховська ПФ)	W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
1	Вихід технічної целюлози, %	35–45%	Н/Д	30–40%	30–40%			S

2	Якість целюлози (лігнін, %)	Дуже низький (<5%)	Середній	Низький (<10%)	Низький (<10%)			S
3	Собівартість сировини	Дуже низька	Низька	Низька/Середня	Середня			S
4	Попередня обробка, грн/т	2500–3500	500–1000	1000–2000	1500–2500	W		
5	Екологічне навантаження (процесу)	Високе	Середнє	Середнє	Високе	W		
6	Комплексність переробки (утилізація всіх компонентів)	Висока	Низька	Низька	Середня			S
7	Наявність інфраструктури (логістика, комунікації)	Низька	Висока	Висока	Висока	W		
8	Можливість виробництва побічних продуктів	Висока (біопаливо, хімічні реагенти)	Низька	Середня	Середня			S
9	Енергоємність процесу (кВт·год/т целюлози)	1800-2200	1200-1500	1300-1600	1500-1800	W		
10	Термін окупності капітальних інвестицій (роки)	5-7	3-5	4-6	4-6	W		
11	Ризик зміни/нестабільності сировинної бази	Високий (залежність від агровідходів)	Низький (деревина)	Низький (деревина)	Низький (деревина)	W		
12	Кваліфікаційні вимоги до персоналу	Високі (нова технологія)	Середні	Середні	Середні	W		
13	Ступінь інноваційності технології	Високий	Низький	Низький	Середній			S
14	Ступінь залежності від імпортного обладнання	Середній	Середній	Середній	Середній		N	

На основі порівняльного аналізу техніко-економічних характеристик, представленого в Таблиці 4.2, сформульовано наступні ключові висновки щодо конкурентоспроможності Проектного рішення відносно існуючих підприємств (Понінківська КПФ, Обухівський ККПК, Каховська ПФ). Ідея проекту має значні внутрішні переваги, які забезпечують високу ринкову привабливість:

- Якість у цьому проекті означає ступінь очищення отриманої технічної целюлози та її придатність для подальших технологічних процесів. Зокрема, мова йде про показники чистоти волокна, низький вміст небажаних домішок та стабільність хімічного складу продукту. Проект демонструє високі показники виходу технічної целюлози на рівні 35–45%, що є значно кращим у порівнянні з традиційними методами. Вміст лігніну у готовому продукті становить менше ніж 5%, що вказує на високий рівень делігніфікації та забезпечує отримання високоякісної, реакційно здатної целюлози. Це підтверджує технологічну перевагу запропонованого методу та створює потенціал для виробництва продукції преміального сегмента.
- Економічна База: Характеристика "Дуже низька собівартість сировини" створює потужний фундамент для забезпечення високої рентабельності та цінової конкурентоспроможності кінцевого продукту.
- Комплексність Переробки: Високий рівень комплексності переробки дозволяє максимізувати використання сировини, отримувати більшу додану вартість і мінімізувати відходи.

Слабкі сторони проекту:

1. Висока вартість попередньої обробки сировини: Операційні витрати на підготовку сировини значно вищі (2500–3500 грн/т) порівняно з конкурентами, що знижує загальну цінову конкурентоспроможність.
2. Висока енергоємність процесу: Технологія потребує значно більшого споживання електроенергії (1800-2200 кВт·год/т целюлози), що збільшує постійні експлуатаційні витрати.

3. Низька наявність інфраструктури: Низький рівень розвитку логістичної та комунікаційної інфраструктури, що ускладнює надійність постачання та вимагає додаткових інвестицій.
4. Тривалий термін окупності капітальних інвестицій: Прогнозований термін окупності (5–7 років) є довшим, ніж у більшості існуючих підприємств-конкурентів.
5. Високе екологічне навантаження процесу: Незважаючи на використання екологічної сировини, сама технологія переробки має значний вплив на довкілля (наприклад, через стічні води), що створює регуляторні та репутаційні ризики.

Технологічний аудит ідеї проекту

Метою даного підрозділу є аудит технологічної здійсненності ідеї проекту: «Одержання технічної целюлози з лігноцелюлозної сировини шкаралуп волоського горіха та кісточок абрикоса» [34].

Таблиця 4.3 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Одержання технічної целюлози зі шкаралупи волоського горіха та кісточок абрикоса.	Технологія 1: Попередня обробка (Кислотно-лужний гідроліз) – застосування розчинів кислот та лугів для руйнування щільної структури сировини та підготовки до делігніфікації.	Наявні, але потребують доопрацювання/оптимізації параметрів (концентрація реагентів, температура, час) саме для цієї складної сировини.	Доступні. Методи є загальновідомими і можуть бути реалізовані на базі лабораторного обладнання кафедри/НТУУ 'КП'.

Продовження таблиці 4.3

2		Технологія 2: Делігніфікація (Лужна варка) – хімічний процес вилучення лігніну для виділення целюлозної фракції.	Наявні (стандартні процеси целюлозно-паперової промисловості, такі як сульфатна або натрієва варка), але потребують адаптації до високого вмісту лігніну та щільності сировини.	Доступні. Технологія базується на класичних хімічних процесах, обладнання для яких є в розпорядженні.
3		Технологія 3: Методи аналітичного контролю – кількісне визначення вмісту целюлози, лігніну, полісахаридів	Наявні (стандартизовані методики, такі як NREL, TAPPI).	Доступні. Методи є загальноприйнятими в науковій сфері, реагенти та прилади для аналізу є у лабораторіях.

Обраною технологією реалізації ідеї проєкту є Комбінована хімічна обробка лігноцелюлозної сировини, що включає оптимізований кислотно-лужний гідроліз (попередня обробка) з подальшою делігніфікацією (лужною варкою).

Саме цей шлях був обраний та підтверджений дослідженнями як найбільш ефективний для руйнування лігнін-вуглеводного комплексу шкаралупи та кісточок, що є необхідною умовою для підвищення виходу та якості целюлози.

Висновок: технологічний шлях реалізації базується на наявних та доступних авторам проєкту методах хімічної переробки лігноцелюлози, які є стандартом у целюлозно-паперовій промисловості.

Аналіз ринкових можливостей запуску стартап- проєкту

Цільовий ринок – це ринок технічної та спеціалізованої целюлози (для хімічної промисловості, виробництва біоматеріалів, мікрокристалічної целюлози).

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців,	“Помірна. До 5 великих гравців у сегменті традиційної целюлози в Україні; вища конкуренція у європейському сегменті (15-20 основних постачальників спеціалізованої целюлози).
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	Високий. Ринок целюлози та паперу в Україні становить мільярди гривень. Сегмент спеціалізованої целюлози (хімічна целюлоза) також є значним і має вищу ціну за тону.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає. Особливо сегмент спеціалізованої та нетрадиційної целюлози завдяки глобальному тренду на заміщення пластику, попиту на біоматеріали та принципам циркулярної економіки (використання відходів).
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Високі. Капіталомісткість (потреба у значних інвестиціях в обладнання для хімічної переробки), технологічні бар'єри (оптимізація процесу під нову сировину), логістичні (організація збору та транспортування відходів).
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Високі. Міжнародні стандарти якості целюлози (ISO, TAPPI), вимоги до екологічної безпеки виробництва (ISO 14001), сертифікація кінцевого продукту (наприклад, REACH для ринку ЄС).

За результатами попереднього оцінювання ринок спеціалізованої целюлози демонструє високу привабливість для входження. Незважаючи на значні бар'єри, пов'язані з капіталомісткістю виробництва, технологічною складністю та вимогами до сертифікації, сегмент перебуває у фазі зростання, що зумовлено глобальними тенденціями розвитку циркулярної економіки та попитом на екологічні біоматеріали. Використання агропромислових відходів як альтернативної сировини створює передумови для формування конкурентної переваги та дає можливість досягнути рівня рентабельності, що перевищує середньогалузевий показник.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Здешевлення сировини, часткова заміна деревної целюлози.	ЦПК, виробники паперу й картону.	Дуже чутливі до ціни, закуповують великими партіями.	Міцність волокна, стабільність партій; безперервні поставки.
2	Одержання високочистої целюлози.	Хімічна та фармацевтична промисловість.	Менш чутливі до ціни, високі вимоги до чистоти.	Висока чистота, сертифікація, техпідтримка.
3	Екологічна сировина з агровідходів.	Виробники біокомпозитів, еко-бренди.	Готові платити премію за екологічність.	Підтверджене походження, еко-сертифікація.

Аналіз ринкових потреб і вимог ключових сегментів споживачів свідчить, що целюлоза з альтернативної сировини, зокрема з агровідходів, має високий потенціал для виходу на кілька перспективних ринкових ніш. Виробники паперу та картону орієнтуються переважно на цінові параметри та стабільність постачання сировини. Хімічний і фармацевтичний сегменти висувають підвищені вимоги до чистоти продукту, однорідності характеристик та наявності відповідних сертифікатів. Екологічно орієнтовані бренди й виробники композитів надають ключового значення походженню сировини, низькому екологічному сліду та доказовим даним щодо сталості виробництва. Така структура попиту вказує на доцільність диференційованого підходу до виробництва та комерціалізації продукту, а також підкреслює перспективність розвитку технологій переробки агровідходів, здатних задовольнити специфічні потреби кожного з визначених сегментів.

Таблиця 4.6 Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Цінова конкуренція	Зниження цін виробниками деревної целюлози, що зменшує привабливість продукту.	Фокус на високочистій та спеціалізованій целюлозі, оптимізація витрат.
Сезонність сировини	Ризик нестачі агровідходів та підвищення логістичних витрат.	Довгострокові контракти, інвестиції у сховища.
Екологічні вимоги	Підвищення витрат через нові стандарти та вимоги до очищення стоків.	Інвестиції у сучасні системи очищення, екосертифікація.

Продовження таблиці 4.6

Скептицизм клієнтів	Небажання переходити на нетрадиційну сировину.	Пільгові тестові партії, співпраця з R&D клієнтів.
Енергетична нестабільність	Аварійні та планові відключення електроенергії, які критично впливають на енергоємне виробництво та призводять до простоїв.	Інвестиції у власні генераційні потужності (на базі біопалива з відходів), встановлення систем безперебійного живлення для критичного обладнання.
Мобілізація персоналу	Втрата ключового висококваліфікованого інженерного та технічного персоналу, необхідного для обслуговування інноваційної технології.	Розробка програми бронювання ключових фахівців, створення системи швидкого навчання та дублювання функцій.
Військові ризики та інвестиційна невизначеність	Висока ймовірність пошкодження виробничих/логістичних об'єктів та значне зниження привабливості проєкту для зовнішніх інвесторів.	Страхування військових ризиків, залучення фінансування від міжнародних фінансових інституцій та фондів реконструкції.

Аналіз основних ринкових, технологічних та ресурсних ризиків демонструє, що проєкт із виробництва целюлози з агровідходів має потенціал успішної реалізації за умови завчасного управління ключовими загрозами. Найвагомішими факторами є цінова конкуренція з традиційними

виробниками, сезонність і нестабільність сировинної бази, посилення екологічного регулювання та низька готовність великих промислових клієнтів переходити на альтернативну сировину. Ефективна реакція компанії передбачає диверсифікацію продуктового портфеля, інвестиції у логістичну та екологічну інфраструктуру, тісну взаємодію з технологічними партнерами й активну демонстрацію конкурентних переваг матеріалу. Реалізація цих заходів забезпечить зниження ризиків, підвищення стійкості виробництва та посилення позицій компанії на ринку спеціалізованої целюлози[35].

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Циркулярна економіка	Попит на матеріали з вторинної сировини, доступ до «зеленого» фінансування.	Еко-позиціонування, отримання міжнародного фінансування.
Локалізація постачання	Потреба підприємств у надійних локальних замінниках імпорту.	Пропозиція продукту як локальної якісної сировини.
Попит на біоматеріали та МКЦ	Зростання потреби у високомаржинальних целюлозних продуктах.	Глибша переробка: виробництво МКЦ і нанофібрил.
Унікальність сировини	Нетипові властивості целюлози з горіхової шкаралупи.	R&D-дослідження, патентування технології чи продукту.

Продовження таблиці 4.7

Інтеграція ветеранів та демобілізація	Доступ до великого пулу мотивованих, дисциплінованих та кваліфікованих кадрів після повернення із зони бойових дій, а також державна підтримка їхнього працевлаштування (пільги, субсидії).	Розробка цільової програми працевлаштування ветеранів, співпраця з центрами реінтеграції, використання податкових та фінансових пільг для компаній-роботодавців.
Децентралізація та енергонезалежність	Державне стимулювання виробників до переходу на власні джерела енергії та можливість стати енергоавтономним.	Використання побічних продуктів (лігніну) для повної енергоавтономії виробництва, що знижує залежність від централізованих мереж.

Висновок: Аналіз ринкових можливостей показує, що проєкт із виробництва целюлози з агровідходів добре узгоджується з глобальними екологічними та економічними трендами. Серед ключових перспектив попит на біоматеріали, розвиток циркулярної економіки, локалізація постачання в Україні та унікальні властивості нетрадиційної сировини. Використання цих можливостей через інновації, патентування, стратегічне позиціонування та участь у програмах «зеленого» фінансування здатне значно підвищити конкурентоспроможність компанії та сформувати стійку ринкову перевагу.

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Тип конкуренції Олігополія	Ринок традиційної деревної целюлози в Україні контролюється кількома великими виробниками (Понінківська КПФ, Обухівський ККПК), що створює високий бар'єр входу для нових гравців і визначає олігополістичну структуру.	Диференціація продукту: екологічність, чистота, унікальність.
Рівень конкуренції Локальний	На початковому етапі проєкт орієнтується на забезпечення сировиною та продажами на території України, а також конкурує з локальними постачальниками (Конкуренти 1, 2, 3) за увагу вітчизняних промислових споживачів.	Сертифікація REACH/ISO, оптимізація логістики для експорту.
Галузева ознака міжгалузева	Конкуренція проявляється між широкими класами товарів, які задовольняють ту саму базову потребу (наприклад, між целюлозою як основою для паперу/композитів та іншими волокнистими наповнювачами).	Акцент на екологічності та перевагах над пластиками й деревною целюлозою.

Продовження таблиці 4.8

Вид товарної конкуренції товарно-родова	Конкуренція відбувається на рівні широкого класу товарів (лігноцелюозна сировина), де продукт з агровідходів бореться за увагу споживача з усіма іншими типами целюлози та навіть деревною сировиною в цілому.	Маркетингове виділення переваг: чистота, властивості.
За характером конкурентних переваг не марочна цінова	Через те, що проєкт є новим і не має сформованого бренду (не марочна), він вимушений робити наголос на ціновому чиннику (Цінова). Це можливо за рахунок дуже низької собівартості сировини (агровідходи), попри високі витрати на переробку.	Ставка на якість, екологічність, технологічність.
Інтенсивність конкуренції не марочна	Як стартап-проєкт, компанія ще не має сформованої ринкової репутації, тому продажі залежать від технічних специфікацій та вартості, а не від сили бренду (марки).	Створення бренду, наукові публікації, участь у конференціях.

Аналіз конкурентного середовища показує, що ринок целюлози в Україні характеризується поєднанням олігополії та можливостей для створення нішевої монополістичної конкуренції завдяки унікальності продукту з агровідходів. Основними конкурентними викликами є сильна позиція традиційних виробників, наявність міжгалузевих замінників та потреба у високих стандартах для виходу на європейський ринок. Водночас

нішевий сегмент спеціалізованої сировини створює значні можливості, якщо компанія робитиме ставку на нецінову конкуренцію: екологічність, чистоту, інноваційність та репутацію. Побудова сильного бренду, отримання міжнародних сертифікацій і активна комунікація наукової та технологічної переваги здатні забезпечити стійку конкурентну позицію на внутрішньому та міжнародному ринках [36].

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Великі ЦПК України; імпортна целюлоза	Агрохолдинги ; біотехнологічні стартапи	Хімреагенти; заготівля шкаралупи/кіс точок	ЦПК; хімовиробники; екокомпозитори	Деревна целюлоза; синтетичні полімери; агро-целюлоза
Висновки	Боротьба помірна; у ніші нижча конкуренція	Вхід можливий, але бар'єри високі	Часткова сила постачальників; потрібна диверсифікація	Сильна позиція клієнтів; фокус на нішах	Замінники сильні; потрібна диференціація

Проект має стійку конкурентну позицію завдяки унікальній технології, високій чистоті продукту та орієнтації на нішеві сегменти, де конкуренція нижча. Основними ризиками залишаються сила постачальників і наявність

сильних товарів-замінників, що потребує стратегічної диференціації та довгострокових контрактів.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Якість кінцевого продукту (чистота та реакційна здатність). Клієнти з хімічної та фармацевтичної промисловості обирають постачальника, який гарантує високу чистоту та стабільні характеристики продукту.	Виняткова технологічна якість. Інноваційна кислотнo-лужна попередня обробка забезпечує високий вихід целюлози (35–45%) і чистоту (лігнін <5%). Це відкриває доступ до преміального сегмента та створює бар'єр для конкурентів.
2	Економічна ефективність (ціна). Масові промислові споживачі дуже чутливі до вартості та обирають найдоступнішого постачальника.	Низька собівартість сировини завдяки використанню агровідходів (шкаралупа волоського горіха, кісточки абрикоса), що забезпечує сильну цінову конкурентоспроможність порівняно з деревною целюлозою.

3	Екологічність походження та відповідність трендам. Екобренди та сталим компаніям важливо зменшувати екологічний слід, тому вони готові платити премію за «зелений» продукт.	Створення доданої екологічної цінності. Проєкт переробляє агровідходи та відповідає принципам циркулярної економіки, що робить продукт привабливим для екоорієнтованих ринків.
4	Унікальність пропозиції та спеціалізація. Компанії що шукають матеріали з нестандартними властивостями (біокомпозити), обирають нішевих виробників.	Фокус на високомаржинальних нішах. Орієнтація на спеціалізовану целюлозу (МКЦ, хімічні реагенти) мінімізує конкуренцію з великими комбінатами та дає змогу створювати унікальні властивості продукту.

Проєкт має значну конкурентну перевагу завдяки поєднанню технологічної інноваційності, високої екологічної цінності, покращених характеристик кінцевого продукту та грамотної стратегії нішевого фокусування. Таке поєднання забезпечує швидкий вихід на ринок і створює бар'єри для потенційних конкурентів.

Таблиця 4.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «назва проекту

Таблиця 11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Одержання високочистої технічної целюлози з лігноцелюлозної сировини»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1- 20	Рейтинг товарів-конкурентів у по- рівнянні з ... (назва підприємства)						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Якість кінцевого продукту (Чистота та реакційна здатність)	5		В			Б		
2	Економічна ефективність (Ціна)	4					В	А	
3	Екологічність походження та відповідність трендам	5		А	Б		В		
4	Унікальність пропозиції та спеціалізація	3	А		В	Б			
5	Операційна ефективність та масштаби виробництва	4					Б		А
6	Надійність постачання та сертифікація (Логістика)	3					В	Б	А

А – Малинська паперова фабрика

Б – Каховинська фабрика

В – Понінківська фабрика

Проект демонструє значні переваги у технологічній якості та екологічності, що забезпечує сильну диференціацію на ринку. Проте слабкі сторони зосереджені у сферах операційної ефективності та логістичної надійності, які вимагають оптимізації, інвестицій у інфраструктуру та укладання стабільних контрактів на сировину.

Порівняльний Аналіз Сильних та Слабких Сторін Проєкту

Назва проєкту: «Одержання технічної целюлози з лігноцелюлозної сировини шкаралуп волоського горіха та кісточок абрикоса»

Порівняльний аналіз проводиться шляхом оцінювання Проєкту відносно гіпотетичного середньозваженого конкурента або лідера ринку за визначеними факторами конкурентоспроможності. Шкала оцінювання від -3 (значно гірше) до +3 (значно краще) відображає позицію проєкту [37].

Таблиця 4.12 – SWOT – аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони (S) – Внутрішні переваги проєкту	Слабкі сторони (W) – Внутрішні недоліки проєкту
Виняткова якість та вихід кінцевого продукту: Досягнення високих показників виходу (35–45%) та чистоти целюлози (лігнін <5%), що дозволяє орієнтуватися на преміальний сегмент ринку (п. 1, 2). Низька собівартість сировини: Використання агровідходів (шкаралупа, кісточки) як дешевої/безоплатної сировинної бази, що є потужним економічним фундаментом (п. 3). Висока комплексність переробки та додана вартість: Технологія забезпечує майже безвідходне виробництво та дозволяє отримувати цінні побічні продукти (біопаливо, хімічні реагенти), максимізуючи прибуток (п. 6, 8).	Високі операційні витрати на підготовку сировини: Вартість попередньої обробки є найвищою серед конкурентів (2500–3500 грн/т), що знижує загальну цінову конкурентоспроможність (п. 4). Висока енергоємність процесу: Технологія потребує значно більше енергії (1800-2200 кВт·год/т) порівняно з традиційними методами, збільшуючи експлуатаційні витрати (п. 9). Нерозвинена інфраструктура: Відсутність необхідної логістичної та виробничої інфраструктури, що ускладнює масштабування та надійність постачання (п. 7).
Високий ступінь інноваційності: Унікальність технології забезпечує конкурентну перевагу та важко копіюється конкурентами (п. 13).	Тривалий термін окупності інвестицій: Проєкт має довший прогнозований термін окупності (5–7 років) порівняно з існуючими підприємствами (п. 10).

	Високе екологічне навантаження процесу: Сама технологія переробки створює значний вплив на довкілля (стічні води), що підвищує регуляторні та штрафні ризики (п. 5).
	Високий ризик нестабільності сировинної бази: Залежність від сезонності та обсягів агровідходів робить планування менш надійним (п. 11).
	Високі кваліфікаційні вимоги: Для експлуатації нової складної технології потрібен висококваліфікований та, відповідно, дорогий персонал (п. 12).
Внутрішні переваги проєкту	Внутрішні недоліки проєкту
Виняткова якість та вихід кінцевого продукту: Досягнення високих показників виходу (35–45%) та чистоти целюлози (лігнін <5%), що дозволяє орієнтуватися на преміальний сегмент ринку (п. 1, 2).	.Високі операційні витрати на підготовку сировини: Вартість попередньої обробки є найвищою серед конкурентів (2500–3500 грн/т), що знижує загальну цінову конкурентоспроможність (п. 4).

На основі SWOT-аналізу, головною стратегічною дилемою проєкту є: чи потрібно спочатку повністю усунути слабкі сторони (W1 – висока вартість обробки, W2 – інфраструктура), чи слід негайно використовувати сильні сторони (S1 – якість, S3 – екологічність) для виходу на ринок.

З огляду на ризик виходу потенційних конкурентів (агрохолдингів) на ринок у середньостроковій перспективі (3–5 років), необхідно обрати альтернативу з найменшими строками та найвищою ймовірністю отримання ресурсів.

Проект демонструє сильні конкурентні позиції за технологічною якістю продукту та екологічністю походження сировини, що є ключовими диференціюючими факторами на сучасному ринку матеріалів. Водночас основними слабкими сторонами залишаються операційні витрати та логістична надійність, зумовлені сезонністю постачання агровідходів і високою вартістю попередньої обробки. Для підвищення конкурентоспроможності проекту доцільно зосередитись на оптимізації технологічних процесів, інвестиціях в інфраструктуру та формуванні стабільних ланцюгів постачання. Порівняльний аналіз підтверджує, що стартап-проект має яскраво виражені біполярні характеристики:

SWOT-аналіз об'єднує внутрішні фактори (сильні та слабкі сторони, Табл. 11) та зовнішні фактори (можливості та загрози, Табл. 6–7) для формування стратегічного плану дій.

Назва проекту: «Одержання технічної целюлози з лігноцелюлозної сировини шкаралуп волоського горіха та кісточок абрикоса»

Альтернативи Ринкового Впровадження Стартап-Проекту

На основі SWOT-аналізу, головною стратегічною дилемою проекту є: чи потрібно спочатку повністю усунути слабкі сторони (W1 – висока вартість обробки, W2 – інфраструктура), чи слід негайно використовувати сильні сторони (S1 – якість, S3 – екологічність) для виходу на ринок [38].

З огляду на ризик виходу потенційних конкурентів (агрохолдингів) на ринок у середньостроковій перспективі (3–5 років), необхідно обрати альтернативу з найменшими строками та найвищою ймовірністю отримання ресурсів.

Таблиця 13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

№ п/п	Альтернатива (комплекс заходів)	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія Нішевого Тестування (Низький старт) Комплекс заходів: - Запуск пілотної установки / малотоннажного виробництва. - Фокус на сегменті високочистої целюлози (МКЦ, хімічні похідні). - Використання наявних або орендованих лабораторних потужностей (мінімізація W2). - Активний пошук інвесторів (O2) під екологічну унікальність. Потрібні ресурси: невеликий стартовий капітал, можливість грантів та «зеленого» фінансування. Перевага: швидкий вихід на ринок і тестування S1 та S3, відтермінування вирішення W1.	Висока	Короткі (1,5–2 роки)

2	Стратегія Комплексної Індустріалізації (Високий старт) Комплекс заходів: - Інвестиції у будівництво повномасштабного промислового комплексу. - Паралельне вирішення W1 (нова технологія), W2 (інфраструктура), W3 (екологічна модернізація). Потрібні ресурси: надзвичайно великі інвестиції (W2, W1), складні для стартапу. Недоліки: довгий час реалізації, високий ризик появи конкурентів (T4).	Низька	Довгі (4–5 років)
3	Стратегія Стратегічного Партнерства Комплекс заходів: - Пошук стратегічного партнера: великого агрохолдингу (W2, W4) або хімічної компанії (W1, O1).	Середня	Середні (2,5–3 роки)

Обрана альтернатива: Альтернатива 1: Стратегія Нішевого Тестування (Низький старт).

Обґрунтування вибору:

1. Простота та Ймовірність Ресурсів: Ця альтернатива вимагає найменших початкових інвестицій, що значно збільшує ймовірність

залучення фінансування, особливо з огляду на екологічну унікальність (O2).

2. Стислі Строки Реалізації: Швидкий вихід на ринок (1,5–2 роки) дозволить випередити потенційних конкурентів (які можуть з'явитися через 3–5 років) та створити репутацію першопрохідника у ніші високочистої целюлози з агровідходів.
3. Мінімізація Ризиків: Замість фінансування усунення всіх W1, W2 та W3 на старті, проєкт фокусується на S1 та S3, генеруючи перші доходи, які можуть бути реінвестовані у пошук ефективного рішення для W1. Це дозволяє перетворити технологічний ризик на керовану проблему.

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Цільова група (короткий опис)	Готовність сприйняття	Орієнтовний попит	Інтенсивність конкуренції	Простота входу
1	Традиційні ЦПК (папір/картон) Потреба: дешевий наповнювач, часткова заміна деревної целюлози.	Середня	Високий	Дуже висока	Низька
2	Хімічна та фармацевтична промисловість Потреба: високочиста целюлоза (МКЦ, ацетати).	Висока	Середній	Помірна	Середня

3	Екоорієнтовані бренди (біокомпозити) Потреба: екологічна сировина з агровідходів.	Висока	Низький	Низька	Висока
---	--	--------	---------	--------	--------

Які цільові групи обрано:

Виходячи з аналізу, обрані цільові групи Сегмент 2 та Сегмент 3.

1. Основна Цільова Група (Якісна Ніша): Хімічна та Фармацевтична промисловість (Сегмент 2). Це найкращий вибір, оскільки проєкт має ключову перевагу (S1 – Висока якість/чистота), яка є критичною вимогою цього сегменту. Вища ціна реалізації допоможе компенсувати високі витрати на обробку (W1).
2. Додаткова Цільова Група (Екологічна Ніша): Екологічно орієнтовані бренди (Сегмент 3). Ця група дозволяє ефективно використовувати екологічну перевагу проєкту (S3) для швидкого отримання перших контрактів і позитивного іміджу.

Обрана стратегія охоплення ринку: концентрований маркетинг (нішова стратегія).

Оскільки Проєкт обрав Альтернативу 1 (Нішеве Тестування), він не може конкурувати з великими гравцями у масовому сегменті (Сегмент 1) через дефіцит інфраструктури та високі витрати (W1, W2).

Стратегія Концентрованого маркетингу дозволяє:

Спрямувати обмежені ресурси на один-два найбільш привабливі та найменш конкурентні сегменти (Сегменти 2 та 3).

Максимально використати унікальні сильні сторони проєкту (S1 – Якість, S3 – Екологічність) для створення стійкої конкурентної переваги у вузькій ніші.

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції / Базова стратегія розвитку
1	Альтернатива 1: Стратегія Нішевого Тестування (Низький старт)	Концентрований Маркетинг (Нішова Стратегія)	1. Технологічне лідерство у якості (чистоті целюлози). 2. Екологічна диференціація (сировина з агровідходів). 3. Швидкість виходу на ринок для тестування. Базова стратегія: Фокусування на Диференціації (Focused Differentiation)

Обґрунтування Базової Стратегії Розвитку

1. Тип стратегії: Стратегія Фокусування на Диференціації (Focused Differentiation).

Фокусування (Концентрація): Проєкт відмовляється від роботи на всьому ринку (масова целюлоза) і концентрує зусилля лише на вузьких, високомаржинальних сегментах Хімічна та Фармацевтична промисловість (виробництво МКЦ) та Екологічно орієнтовані бренди (Табл. 14).

Диференціація: Проєкт не конкурує за ціною (не може через W1), а пропонує унікальну цінність, яка виправдовує преміальну ціну:

Унікальна якість (найнижчий вміст лігніну).

Екологічна перевага (використання агровідходів, S3).

2. Відповідність:

Ця стратегія прямо використовує сильні сторони S1 та S3 та усуває необхідність вступати в пряму цінову боротьбу, що є критично важливим для подолання слабкої сторони W1 (висока вартість обробки).

Стратегія також відповідає обраній Альтернативі 1 (Низький старт), оскільки нішеве виробництво не вимагає одразу великих інвестицій в інфраструктуру (W2).

Висновок: Для стартап-проекту, який має потужну технологічну перевагу, але обмежений у ресурсах, Стратегія Фокусування на Диференціації є оптимальним вибором для успішного ринкового впровадження.

Базова стратегія конкурентної поведінки визначає, як Проект взаємодіятиме зі своїми конкурентами та досягатиме своїх цілей у вибраних сегментах (Хімічна промисловість та Еко-бренди)

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні, не є. Існують виробники традиційної целюлози, а також хімічні компанії, що виробляють МКЦ та інші похідні.	Шукатиме нових та забиратиме існуючих у конкурентів у ніші.	Стратегія Атакуючого Маркетингу (Нішевого)

2		Шукатиме нових (екологічно орієнтовані бренди, які ще не використовують целюлозу з агровідходів). Забиратиме існуючих (хімічні підприємства, що зараз купують дорогу імпорту високочисту целюлозу).	Навпаки, пропонуватиме перевершені характеристики: вищу чистоту та екологічне походження.
---	--	---	---

Обрана Стратегія: Стратегія Атакуючого Маркетингу (Нішевого) / Наступника (Follower to Leader Strategy).

Проект не є абсолютним першопрохідцем (pioneer), оскільки ринок целюлози існує давно. Однак, у своїй вузькій ніші (виробництво високочистої целюлози з агровідходів), він виступає як атакуючий нішевик (challenger), який має на меті зайняти лідируючу позицію.

Ключові дії в межах стратегії:

1. Напад на Слабості Лідерів: Не атакувати лідерів у масовому сегменті (ціна), а зосередитися на їхній слабкості у ніші високочистої та екологічної сировини. Багато традиційних ЦПК не мають технологій для досягнення такої чистоти целюлози, як це можливо з агровідходів.
2. Диференціація через Якість (S1): Активно просувати технологічну перевагу (S1) та екологічність (S3) як основні причини для заміни існуючих постачальників (наприклад, імпортової целюлози).
3. Пошук Нових Клієнтів: Створювати попит серед екологічно орієнтованих компаній, які раніше не розглядали целюлозу з агровідходів (O2).

Ця стратегія відповідає загальній Стратегії Фокусування на Диференціації і дозволяє Проєкту агресивно, але точково, просувати свій унікальний продукт на ринку. Стратегія позиціонування Проєкту полягає у створенні унікального, чіткого та бажаного образу у свідомості цільової аудиторії (Хімічна промисловість та Еко-бренди), що ґрунтується на технологічній перевазі та екологічній унікальності.

Всі елементи стратегії узгоджуються з:

Вимогами (Табл. 5): Висока чистота, екологічність, надійність постачання, сертифікація. Базовою стратегією (Табл. 15): Фокусування на Диференціації. Конкурентною стратегією (Табл. 16): Атакуючий Маркетинг (Нішевий).

Таблиця 4.17 Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту
1	Висока чистота целюлози (лігнін <5%), хімічна інертність	Стратегія Фокусування на Диференціації	Технологічна якість, висока чистота продукту (S1)	Технологічний Лідер у переробці агровідходів
2	Екологічне походження, сертифікованість		Екологічна перевага сировини (S3)	Сталий Вибір: Целюлоза, що рятує довкілля
3	Надійність постачання, техпідтримка		Дешева сировина (S2), потенційна операційна ефективність	Надійний Нішевий Постачальник високої якості

Результатом аналізу є чітка, узгоджена система ринкової поведінки:

1. Обрана Ринкова Позиція (УТП):

«Високочиста технічна целюлоза з агровідходів ідеальна хімічна сировина, яка підтримує принципи циркулярної економіки»

2. Стратегічні Напрями Роботи Компанії:

Таблиця 18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Здешевлення сировини, часткова заміна деревної целюлози	Попередньо оброблена лігноцелюлозна сировина з підвищеною доступністю полісахаридів; підвищення ефективності переробки.	Дуже низька собівартість сировини (агровідходи); висока рентабельність.
2	Одержання високочистої целюлози	Отримання технічної целюлози з високою реакційною здатністю.	Вихід 35–45%, вміст лігніну <5%; якість вища за конкурентів.
3	Екологічна сировина з агровідходів	Переробка великих обсягів відходів у корисний продукт; підтримка циркулярної економіки.	Екологічна унікальність; комплексна переробка з високою доданою вартістю.

Аналіз ключових переваг концепції потенційного товару показує, що проєкт має чітку ринкову цінність та здатність ефективно конкурувати у своїй ніші завдяки поєднанню економічних, технологічних та екологічних переваг.

По-перше, використання агровідходів як основної сировини забезпечує надзвичайно низьку собівартість виробництва та створює фундамент для цінової конкурентоспроможності. Це дозволяє проєкту пропонувати

альтернативу деревній целюлозі й бути привабливим для масових промислових споживачів, які прагнуть знизити витрати.

По-друге, здатність отримувати високочисту технічну целюлозу з високим виходом та дуже низьким вмістом лігніну формує технологічну перевагу над існуючими аналогами. Це відкриває доступ до високоприбуткових сегментів, таких як хімічна та фармацевтична промисловість, де якість є критично важливою.

По-третє, екологічність виробництва та використання агровідходів забезпечують значну диференціацію товару на ринку. Проєкт органічно вписується в глобальні тренди циркулярної економіки, сталого розвитку та ESG-вимог, що робить продукт привабливим для екологічно орієнтованих брендів.

Таким чином, концепція потенційного товару поєднує у собі економічну вигоду, високі технологічні параметри та екологічну цінність, що створює стійку та комплексну конкурентну перевагу для виходу на ринок і подальшого масштабування.

Трирівнева маркетингова модель товару дозволяє деталізувати, що саме Проєкт пропонує споживачеві, окрім його фізичної сутності, і як він захищатиметься від копіювання [39].

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом (Core Product)	Опис базової потреби: Забезпечення високотехнологічної промисловості надчистою лігноцелюлозною сировиною та екологічно відповідальних виробників матеріалами циркулярної економіки. Основна вигода: Гарантована якість (низький вміст лігніну) та стале походження.

II. Товар у реальному виконанні (Actual Product)	Властивості: 1) Дуже низький вміст лігніну ($\leq 5\%$), 2) 100% сировина з агровідходів, 3) Стабільні фізичні показники. Якість: Відповідає ISO 9001 та TAPPI. Тестування кожної партії. Пакування: Мішки/біг-беги із захистом від вологи та маркуванням. Марка: «KPI EcoCell – NutriCell».
III. Товар із підкріпленням (Augmented Product)	До продажу: Технічні консультації, R&D підтримка, тестові зразки. Після продажу: Гарантія, логістика JIT, повернення у разі невідповідності, еко-сертифікація.

Висновок: Аналіз трьох рівнів моделі товару демонструє, що концепція продукту NutriCell має чітко визначену цінність для цільових B2B-сегментів і здатна сформувати стійку конкурентну перевагу на ринку спеціалізованої технічної целюлози.

На рівні товару за задумом продукт відповідає ключовим потребам галузі: забезпечує високу чистоту, стабільні властивості та екологічне походження, що є критично важливим для хімічної та фармацевтичної промисловості.

На рівні реального товару проєкт демонструє технологічну зрілість: визначені чіткі параметри якості, стандарти сертифікації, форма пакування та брендова ідентичність. Це дозволяє формувати довіру серед професійних споживачів і диференціюватися від масової деревної целюлози та імпорتنих аналогів.

Рівень товару з підкріпленням підсилює привабливість продукту через сервісні компоненти: технічний супровід, гнучку логістику, можливість тестування та екологічну сертифікацію. Саме цей рівень створює додаткову цінність, яка підвищує лояльність клієнтів і забезпечує тривалі партнерські відносини.

Таким чином, товар NutriCell характеризується комплексною ціннісною пропозицією, що поєднує технологічну якість, екологічність та сервісну

підтримку. Це дозволяє проєкту зайняти нішеву, але стратегічно перспективну позицію на ринку та ефективно конкурувати з існуючими виробниками високочистої целюлози [39].

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи	Верхня та нижня межі ціни
1	Масова целюлоза: 600–900 USD/т	Хімічна целюлоза: 1000–1500 USD/т	Високий (Хімічна та фармацевтична промисловість)	Нижня межа: 900–1100 USD/т
2	Імпортна спеццелюлоза: 1500–2500 USD/т	МКЦ: 3000–7000 USD/т	Готовність платити премію за чистоту та екологічність	Верхня межа: 1500–2000 USD/т

Висновок щодо Меж Встановлення Ціни

Орієнтовний Діапазон Встановлення Ціни: 900 – 2000 USD/тонна.

Нижня Межа (900–1100 USD/т): Встановлюється для забезпечення покриття високих операційних витрат на попередню обробку (W1) та мінімальної рентабельності. Продаж за ціною, нижчою за цей рівень, є можливим лише для великих партій на початку запуску виробництва для залучення клієнтів (якщо ціна покриває принаймні змінні витрати). Верхня Межа (1500–2000 USD/т): Встановлюється на рівні імпортних, високоякісних, нішевих целюлоз. Проєкт може реалізовувати свій продукт ближче до цієї

межі, використовуючи премію за унікальну чистоту (S1) та екологічне походження (S3).

Стратегічне Рішення: Проєкт має прагнути до ціноутворення на рівні 1300–1700 USD/т, що дозволить:

1. Уникнути прямої цінової конкуренції з масовою целюлозою.
2. Виправдати високу ціну у свідомості клієнтів за рахунок стратегії Фокусування на Диференціації.
3. Залишити клієнтам достатню маржинальність при виробництві МКЦ (які коштують 3000–7000 USD/т).

Вибір системи збуту ґрунтується на стратегії Фокусування на Диференціації та вимогах до високотехнологічного, нішевого товару. Проєкт не може дозволити собі втратити контроль над процесом продажів, оскільки ключовою перевагою є якість та технічна підтримка.

Таблиця 4.21 Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки	Функції збуту постачальника	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Професійна закупівля (B2B). Рішення на основі лабораторних випробувань, висока чутливість до якості.	Технічний консалтинг, надання технічних специфікацій, підтримка інтеграції продукту.	Короткий канал: прямі поставки виробнику.	Прямі продажі + технічна підтримка.
2	Надійність постачання та сертифікація є критичними, довгострокові контракти.	Контроль якості, сертифікація, забезпечення прозорого ланцюга постачання.	Прямий канал або мінімум посередників.	Контракти з ключовими клієнтами, аудит якості.
3	Екоорієнтовані клієнти потребують прозорості походження та екологічного сліду.	Продажі ключовим клієнтам, формування довгострокових відносин.	Прямий канал збуту.	Система прямих продажів з екологічною звітністю.

Висновок та Обґрунтування Оптимальної Системи Збуту

Оптимальна Система Збуту: Гібридна/Селективна.

Власна система (Прямі продажі): Обов'язкова для ключових клієнтів (Хімічна промисловість). Це дозволяє здійснювати прямий технічний консалтинг, контролювати якість продажів та отримувати прямий зворотний зв'язок для R&D (підтримка S1).

Залучена система (Агенти/Дистриб'ютори): Може використовуватися для міжнародного ринку (експорт) або для роботи з дрібними екологічно орієнтованими клієнтами (Сегмент 3). Посередники можуть взяти на себе логістичні функції та митне оформлення, зменшуючи навантаження на Проєкт (подолання W2).

Глибина Каналу Збуту: Прямий (Нульовий) або Короткий (Однорівневий).

Прямий канал використовується для всіх стратегічно важливих клієнтів, де потрібна висока якість та технічна підтримка.

Короткий канал (через технічних агентів або нішевих дистриб'юторів) може бути використаний для географічного розширення, але посередник повинен мати власну технічну експертизу для продажу високотехнологічного продукту.

Вид Посередників:

Технічні агенти/Дистриб'ютори: Посередники, які спеціалізуються на продажі хімічної сировини або інгредієнтів. Вони повинні мати знання про продукт, щоб підтримувати стратегію диференціації.

Логістичні оператори (3PL): Для роботи з масою та складськими потребами (допомога у подоланні W2).

Концепція комунікацій базується на Стратегії Фокусування на Диференціації та Стратегії Атакуючого Нішевого Маркетингу. Основна мета донести до цільової аудиторії (Хімічна промисловість та Еко-бренди) унікальність продукту (S1 - якість, S3 - екологічність).

Таблиця 5.22 Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій	Ключові позиції для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Хімічна та фармацевтична промисловість (B2B). Раціональна поведінка, орієнтація на технічні параметри та стандарти. Рішення ухвалюються після лабораторних тестів.	Прямі продажі, технічні зустрічі, галузеві конференції, наукові публікації, LinkedIn, професійні B2B-платформи.	1. Технологічний Лідер у чистоті та стабільності продукту. 3. Надійний Нішевий Постачальник.	Інформувати та переконати технічними аргументами. Мотивувати до тестування продукту.	«NutriCell - технічна целюлоза з мінімальним вмістом лігніну ($\leq 5\%$). Замовте зразок і переконайтеся в чистоті.»
2	Екологічно орієнтовані B2B-клієнти. Приймають рішення на основі цінностей сталості, прозорості та екологічного сліду.	ESG-звіти, екологічні виставки, ЗМІ, digital-маркетинг, SMM.	2. Сталий Вибір (Sustainable Source).	Формувати лояльність і створювати емоційну асоціацію «зелений продукт = відповідальність».	«NutriCell -100% целюлоза з агровідходів. Ваш продукт починається з екології. Підтримайте циркулярну економіку.»

4P (Основні рішення)

Товар (Product): Спеціалізована технічна целюлоза NutriCell - чистота $\leq 5\%$ лігніну, 100% з агровідходів.

Ціна (Price): Преміальна ціна 1300–1700 USD/т, обґрунтована чистотою та екологічністю.

Збут (Place): Гібридна/селективна система: прямий канал для ключових клієнтів, технічні агенти для експорту.

Просування (Promotion): Атакуючий маркетинг: технічні доповіді, B2B-платформи, екологічний брендинг й ESG-комунікація.

5.5) Концепція Маркетингових Комунікацій

Концепція комунікацій базується на Стратегії Фокусування на Диференціації та Стратегії Атакуючого Нішевого Маркетингу. Основна мета - донести до цільової аудиторії (Хімічна промисловість та Еко-бренди) унікальність продукту (S1 - якість, S3 - екологічність).

Таблиця 22. Концепція маркетингових комунікац

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій	Ключові позиції	Завдання та концепція рекламного звернення
1	Хімічна/Фармацевтична промисловість (B2B): Раціональний вибір, заснований на технічних даних та сертифікації. Вимагають високої чистоти та надійності.	Прямі продажі, технічні зустрічі, галузеві конференції, наукові публікації, LinkedIn, професійні B2B-платформи.	1. Технологічний Лідер 3. Надійний Нішевий Постачальник	Інформування та переконання. Довести технічні переваги. Рекламне звернення: «NutriCell: Целюлоза з мінімальним вмістом лігніну. Замовте технічний зразок та переконайтеся у чистоті.»
2	Екологічно орієнтовані бренди (B2B): Емоційний вибір, заснований на сталості, прозорості та іміджі. Готові платити премію.	ESG-звіти, екологічні виставки, ЗМІ, digital marketing (SMM) з акцентом на походження сировини.	2. Сталий Вибір (Sustainable Source)	Формування іміджу та лояльності. Рекламне звернення: «Ваш продукт починається з екології. NutriCell: 100% отримана з агровідходів.»

Маркетингова програма проекту повністю узгоджується з обраною Альтернативою 1 (нішеве тестування) і мінімізує ризики слабких сторін (W):

Вибір нішевого сегменту та преміальне ціноутворення дозволяють компенсувати високу вартість обробки (W1).

Прямі продажі та фокус на якості дозволяють швидко створити надійну репутацію, необхідну для подолання інфраструктурного дефіциту (W2) та скептицизму покупців (T3).

Екологічне позиціонування дозволяє залучити "зелене" фінансування для вирішення екологічних ризиків (W3/T2).

4.6) Висновки за результатами аналізу ринкових можливостей та маркетингової стратегії

1. Можливість ринкової комерціалізації проєкту

Комерціалізація є можливою за умови концентрації на нішевих сегментах.

Попит. Стабільний попит на целюлозу підтверджує потенціал виходу на ринок, особливо у сегментах високочистої продукції та екологічної сировини з агровідходів.

Динаміка ринку. Ринок демонструє позитивну тенденцію розвитку, що пов'язано зі зростанням інтересу до біоматеріалів та циркулярних технологій.

Рентабельність. У вузьких сегментах можливий рівень рентабельності на рівні 20–30%, що дозволяє компенсувати підвищені операційні витрати на первинну обробку сировини.

2. Перспективи впровадження з огляду на клієнтів, конкуренцію та бар'єри

Перспективи впровадження оцінюються як сприятливі.

Клієнти. Визначені групи споживачів віддають перевагу якості та екологічності продукції, що відповідає ключовим характеристикам проєкту.

Бар'єри входження. Хоч бар'єри є високими, вони одночасно знижують ймовірність появи нових конкурентів у вибраній ніші.

Конкуренція. У масовому сегменті конкуренція є значною, однак у нішевому сегменті вона помірна. Стратегія фокусування на диференціації дає змогу уникати прямої цінової конкуренції з великими виробниками.

Конкурентоспроможність. Технологічна якість і екологічність є сильними сторонами проєкту. Водночас потребують вирішення питання високої вартості первинної обробки та логістичних обмежень.

3. Рекомендована альтернатива впровадження

Оптимальною є Альтернатива 1 – стратегія нішевого тестування (низький старт).

Вона забезпечує швидке залучення необхідних ресурсів і дає можливість реалізувати проєкт у стислі строки (1,5–2 роки).

Такий підхід дозволяє оперативно використати наявні конкурентні переваги та запобігти можливому посиленню конкурентного середовища у середньостроковій перспективі.

Обрана стратегія фокусування на диференціації узгоджується з цією моделлю впровадження.

4. Доцільність подальшої імплементації проєкту

Подальша імплементація є обґрунтованою, за умови дотримання таких вимог:

Чітке фокусування на обраному нішевому сегменті.

Оптимізація технологічних процесів і зниження вартості первинної обробки сировини.

Налагодження ефективної системи збору й зберігання сировини для мінімізації сезонних ризиків.

Проєкт має потенціал для формування конкурентної позиції та виходу в лідери у вузькоспеціалізованій, високомаржинальній ніші ринку біоматеріалів.

5 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Сірчана кислота (H_2SO_4) – дуже сильний концентрований кислотний реагент з надзвичайно низьким рН (до $\sim 0,3$). Вона агресивно кородує матеріали і органічні тканини, викликаючи опіки живих організмів. У водних екосистемах H_2SO_4 спричиняє різке зниження рН і «кислотний шок», що смертельно небезпечно для риб та інших організмів. Мінералізуючи ґрунтові сполуки, кислота вимиває з ґрунту кальцій, магній, алюміній тощо та утворює розчинні сульфати. Це призводить до десорбції важких металів і порушення гідрологічного та хімічного балансу ґрунту. Гідроксид натрію (NaOH) – сильний луг, що кородує шкіру і слизові, руйнує білки та жири. При потраплянні в довкілля він підвищує рН води і ґрунту, що також є токсичним для біоти. Наприклад, розлив NaOH здатен миттєво підняти лужність річки чи ставу, викликаючи загибель риби і плаваючих мікроорганізмів. Обидва реагенти – сильні окисники чи відновники (H_2SO_4 – сильний кислотний окисник) – що спричиняє утворення отруйних газів (SO_2 , SO_3) у разі нагрівання або пригоряння. У повітряній фазі токсичними є аерозольні дисперсії та випари цих речовин, які подразнюють дихальні шляхи. Висока корозійність обох хімікатів призводить до руйнування промислових резервуарів і трубопроводів; наприклад, розчини NaOH руйнують алюміній і деякі сплави, а H_2SO_4 роз’їдає металеві та бетонні конструкції.

Зменшення негативного впливу: зберігання, транспортування, нейтралізація та утилізація
Зберігання і пакування: Хімікати слід утримувати в окремих спеціалізованих приміщеннях із підлогою, захищеною від проникнення розливів. Не дозволяється зберігати кислоти чи луги в підвалах чи суміжно з органічними матеріалами. Ємності мають бути витримані з корозійно-стійких матеріалів: для NaOH – сталь із антикорозійним покриттям або інертні полімери (HDPE, PVC, PTFE); для концентрованої H_2SO_4 – спеціальний скловолокно або кислотостійка сталь. Можливі фугування й

вторинні ємності (бомби), що запобігають витоку. Приміщення обладнують вентиляцією та системами пожежогасіння.

Транспортування: Обидві речовини класифікуються як «клас 8 – корозійні матеріали», тому їх перевезення регламентується правилами «ADR/RID» (маркування танкерів відповідним знаком). Автомобілі-технічні засоби повинні бути спеціально обладнані (спиртна, стійка до корозії тара) і перевірятися перед виїздом. Супроводжуючий персонал має бути забезпечений ЗІЗ. Наприклад, вантажівки з H_2SO_4 повинні мати попереджувальні таблички «18 1830» за стандартом ООН. Забороняється переносити кислоти/луги в ненадійних відкритих судинах. Нейтралізація: відпрацьовані кислі стоки ($\text{pH} < 3$) перед випуском у каналізацію мають бути нейтралізовані лугом (типово гашеним вапном $\text{Ca}(\text{OH})_2$ або NaOH) до $\text{pH} \sim 7$. Навпаки, лужні стоки ($\text{pH} > 11$) – нейтралізують кислотами (переважно H_2SO_4 чи HCl) чи вуглекислим газом до безпечного 6,5–8,5. Можна застосовувати змішування кислотних і основних стоків для взаємoneйтралізації. Також можливе поглинання дисоційованих кислот аміаком (NH_3) з утворенням добрив (амонійні солі). У процесі нейтралізації утворюються солі (CaSO_4 , Na_2SO_4 , NH_4HSO_4 тощо), які або осаджують і вилучають (наприклад, гіпс CaSO_4), або направляють на подальшу утилізацію.

Утилізація відходів: Залишки реагентів і осад нейтралізації слід збирати та передавати на спеціалізовані пункти утилізації. Заборонено зливати концентровані кислоти чи луги у міську каналізацію. Наприклад, інструкції рекомендують ліквідувати відпрацьовані рідини як небезпечні відходи за всіма вимогами регіональних нормативів. Розчини гашеного вапна з осадом гіпсу, а також розведені солі можна направляти для сільськогосподарського використання (як мінеральні добрива) або переробки. Загалом підприємства мають спрямовуватися на мінімізацію утворення відходів і повторне використання сировини.

Стічні води після кислотної та лужної обробки рослинної сировини відрізняються за хімічним складом та pH : після кислотної обробки: Вода має

різко низьке рН (1–3) і містить велику кількість розчинених речовин. Головними компонентами є сульфат-іони (SO_4^{2-}) від невитраченої H_2SO_4 або її нейтралізації, а також низькомолекулярні продукти розпаду вуглеводів. Під дією H_2SO_4 геміцелюлоза розкладається з утворенням пентоз і гексоз у розчин. Частина цих пентозанів перетворюється на фуранові сполуки (фурфурол), а гексози – на 5-гідроксиметилфурфурол (ГМФ), оцтову, мурашину та левулінову кислоти. Концентрація хімічного споживання кисню (ХСК) дуже висока через велику масу розчинених органіки (цукрів, фенольних похідних, гумінових кислот тощо). Вода може мати темно-коричневий колір від фенолів, зважені фрагменти лігніну або гумінові речовини.

Після лужної обробки: Стічні води мають дуже високий рН (~12) та містять значну кількість гідроксидів і карбонатів натрію чи кальцію. До складу також входять сполуки лігніну та його похідні (феноли, таніни), вивільнені з рослинних клітинних стінок. Луг ефективно делігніфікує матеріал, тому після нейтралізації зазвичай отримують бурі стоки із фенольними забрудниками. Така вода має високий ХСК і показники забрудненості (феноли, БСК) у десятки чи сотні мг/л.

Таблиця 5.1. Приблизний склад стічних вод від кислотної обробки шкаралупи горіха до та після очищення.

Показник	Після кислотної обробки	Після нейтралізації і очищення
рН	≈1–3 (дуже кисла)	≈6,5–8,5 (нейтральна)
Сульфати SO_4^{2-}	Дуже висока концентрація (г/л)	Осаджені або перетворені у гіпс (CaSO_4)
$\text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+}$	Невелика (залежно від розчинника)	Збільшені (утворюються солі нейтралізації)
Органічні речовини	Висока (розчинені цукри, фуранові сполуки, НМФ, фенольні кислоти)	Значно знижена (фільтрація, біологічна деградація)
COD, mg/L	10^4 – 10^5	10^2 – 10^3 (після очистки)

Фізико-хімічні методи: передбачають видалення домішок осадженням, фільтрацією, коагуляцією та флокуляцією. Наприклад, доліди (FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) використовують для зв'язування зважених і колоїдних домішок, утворюючи осад, що легко видаляється фільтруванням. Лужні та кислотні стоки змішують для взаємної нейтралізації і зворотного осадження (метод реагентної нейтралізації). У випадку кислотних газів застосовують адсорбцію лужними розчинами або аміаком. Після нейтралізації утворені гідроксиди ($\text{Fe}(\text{OH})_3$ тощо) осаджуються. Для видалення органічних летких домішок (фуранів, фенолів) можуть застосовуватися активоване вугілля або абсорбенти (біосорбенти). Активоване вугілля ефективно знижує ХСК і БСК стоків, адсорбуючи залишкові органічні сполуки.

Біологічні методи: полягають у використанні мікроорганізмів для розщеплення органічних забрудників. Після нейтралізації рН стічних вод підтримують у нейтральних межах і пропускають через аеробні або анаеробні біореактори. Активний мул (населений бактеріальними консорціумами) споживає розчинену органіку як джерело вуглецю та енергії. Так, ефективність біологічного очищення може сягати 70–90% за ХСК при оптимальних умовах. Анаеробні методи (метаногенез) дозволяють одночасно знизити органічне навантаження і одержати біогаз. Біотрансформація може включати специфічні ферменти (целюлази, ксиланази) або біоремедіаційні культури, що руйнують фенольні забрудники без утворення токсичних побічних продуктів.

Сорбційні підходи: ґрунтуються на поглинанні забрудників на поверхні твердих носіїв. Використовують активоване вугілля, цеоліти, полімерні та природні сорбенти (наприклад, гранули дерево-вугілля із шкаралупи горіха). Сорбція особливо ефективна для фенолів, фарбувальних та хлорорганічних сполук. Після насичення сорбентів їх регенерують або утилізують як небезпечний відхід.

Нейтралізаційні заходи: детально описані вище. Установки для хімічного окислення (Fenton, озонування, пероксид) також використовують

для розкладання стійких органічних речовин. Після всіх етапів очищення вода повинна відповідати місцевим нормам за забрудненнями і рН.

В Україні діяльність з поводження з небезпечними речовинами регулюється Водним кодексом, Кодексом України про надра, Законодавством про охорону навколишнього середовища та Законодавством про відходи. Важливою є роль Державних санітарних норм (ДСанПіН) та ДСТУ, які встановлюють гігієнічні вимоги до складу води. Зокрема, Правила приймання стічних вод (наказ Мінрегіону від 01.12.2017 №316) фіксують вимоги до скиду стоків у централізовані мережі: кожен суб'єкт господарювання повинен укладати договори з водоканалом і дотримуватись локальних нормативів з максимально припустимих концентрацій забруднювачів. Практично встановлені межі рН скидів від 6,5 до 8,5 (за ДСанПіН та місцевими правилами). Порухення цих вимог тягне за собою адміністративну відповідальність згідно із Кодексом України про адміністративні правопорушення та Екологічним кодексом.

В Європейському Союзі діють аналогічні положення: Директива 91/271/ЄЕС щодо очищення міських стічних вод, Директива 2006/11/ЕС щодо забруднення вод, Директива 2008/98/ЕС (рамкова Директива з відходів), а також Регламент CLP (1272/2008) з класифікації небезпечних речовин (який класифікує H_2SO_4 і NaOH як речовини класу «корозійні»). Наприклад, стандарти безпеки на заводах з виготовлення добрив передбачають скраплення та переробку кислого диму, систему очищення SO_2 («скрубери» тощо). Крім того, діють європейські нормативи щодо максимально допустимих викидів хімічних речовин у довкілля і граничних концентрацій по важких металах та фенолах у стічних водах.

Використання нейтралізованих добрив: Нейтралізація сірчаної кислоти аміаком утворює сульфат амонію $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – поживну речовину для рослин. Це дозволяє перетворювати «кислі» стоки на добриво. Аналогічно реагенти, які утворюють солі (наприклад, CaSO_4 – гіпс), можуть продаватися як побічні продукти.

Рециркуляція води: Замикання водного циклу в підприємстві дає змогу зменшувати скиди. Наприклад, конденсат печей і гальванічних процесів часто повторно використовують після очищення.

Біологічна обробка як попередня стадія: На деяких фабриках попередньо обробляють стоки біофільтрами з лужними культурами мікроорганізмів, що знижують фенольні сполуки до хімічних безпечних форм.

Інноваційні технології очищення: Впроваджують мембранні установки (наприклад, мембранні біореактори), що поєднують ультрафільтрацію з біологічним очищенням для отримання високоякісної води з мінімальними втратами.

Контроль та моніторинг: Застосування систем автоматичного контролю якості стоків дозволяє оперативно реагувати на перевищення норм і запускати аварійні нейтралізуючі реагенти.

В усіх вищезазначених заходах акцент робиться на мінімізації відходів та утилізації побічних продуктів. Як рекомендує практика, кожне підприємство має не лише видаляти забруднення, але й шукати можливості для утилізації побічних продуктів і повторного використання речовин.

ВИСНОВКИ

1. Виконано огляд літератури щодо способів отримання або обробки рослинної сировини для одержання біопалива другого покоління.
2. Обрано методики під час ефективної переробки шкарлуп волоського горіху і кісточок абрикосу на субстрат для біохмічної конверсії.
3. Проведено обробку кісточок волоського горіху та абрикосових кісточок в середовищі розбавленої сірчаної кислоти та розбавленого розчину лугу, досліджено вплив тривалості обробки на вихід субстрату та вміст в ньому залишкового лігніну, було встановлено, що збільшення тривалості варіння закономірно призводить до зменшення зазначених показників, при чому перевищення тривалості вище 40 хв є недоцільним, оскільки в даному випадку вже спостерігається суттєве зниження виходу продукту, що в подальшому буде впливати негативно на вихід поценційного біопалива.
4. Для зразків одержаних шляхом лужної обробки протягом 40 хв були визначені детальний склад субстрату, за яким встановлено що основна частина субстрату припадає на целюлозу оскільки вміст глюкози становить для шкарлуп кісточок абрикоса $27,43 \pm 0,29$ %, а для шкарлуп волоського горіха $75,58 \pm 1,14$ %.
5. Було досліджено відпрацьований розчин після кислотної обробки і встановлено, що розчиняється близько половини компонентів рослинної сировини, більша частина яких представлена низькомолекулярними полісахаридами, що свідчить про перебіг гідролітичної деструкції.
6. Отримані субстрати піддавали обробці шляхом ферментативного гідролізу з використанням промислового целюлазного комплексу в результаті був встановлений вихід глюкози при чому показано що збільшення тривалості процесу ферментного гідролізу закономірно призводить до збільшення виходу глюкози, максимальний вихід глюкози отримано при використанні субстрату на основі максимального виходу глюкози було досягнуто при використанні

субстратів після лужної попередньої обробки, зокрема 99,7 % для шкаралупи кісточок абрикоса та 94,6 % для шкаралупи волоського горіха.

7. За для комерціалізації наукової розробки було розроблено стартап-проект в якому показано слабкі і сильні сторони даної розробки, що може бути покладено в основу подальшого масштабування даного виду обробки.

8. Розглянуто потенційні ризики при роботі з такими реагентами як сульфатна кислота та гідроксид натрію та описано можливі шляхи уникнення всіх можливих ризиків для забезпечення ефективної роботи в умовах даного виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Demirbas, A. Biofuels securing the planet's future energy needs. *Energy Conversion and Management*. 2009. Vol. 50. P. 2239–2249.
2. Cherubini, F. The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*. 2010. Vol. 51. P. 1412–1421.
3. McKendry, P. Energy production from biomass (Part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*. 2002. Vol. 83. P. 37–46.
4. (Джерело відсутнє)
5. Sarkar, N., Ghosh, S. K., Bannerjee, S., Aikat, K. Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*. 2012. Vol. 37. P. 19–27.
6. Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., Moral, R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100. P. 5444–5453.
7. Lua, A. C., Yang, T. Characteristics of activated carbon prepared from pistachio-nut shell by zinc chloride activation. *Biomass and Bioenergy*. 2004. Vol. 27. P. 31–39.
8. Mohanty, A. K., Misra, M., Drzal, L. T. Sustainable bio-composites from renewable resources. *Journal of Polymers and the Environment*. 2002. Vol. 10. P. 19–26.
9. Доступ до ресурсу: <https://www.mdpi.com/2673-6209/4/3/39>.
10. Доступ до ресурсу:
<https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2554>.
11. Доступ до ресурсу: <https://visnyk-nanu.org.ua/ojs/index.php/v/article/view/4329/4067>.
12. Доступ до ресурсу: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2021/07/BioRes_16_3_6512_Chun_LYK_Review_Recent_Biochar_Prodn_Biomass_Classif_Pyrol_18707.pdf.

13. Доступ до ресурсу:
https://www.worldbioenergy.org/uploads/241023_GBS_Report.pdf.
14. Доступ до ресурсу: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/9/5515>.
15. Доступ до ресурсу: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20824297>.
16. Доступ до ресурсу:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953425005446>.
17. Доступ до ресурсу: <https://www.mdpi.com/2073-4344/11/3/309>.
18. Доступ до ресурсу: <https://www.mdpi.com/2073-4344/11/3/309>.
19. Доступ до ресурсу: <https://link.springer.com/article/10.1186/s42269-019-0094-x>.
20. Доступ до ресурсу: <https://www.intechopen.com/chapters/43715>.
21. Sun, Y., Cheng, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology*. 2002. Vol. 83, No 1. P. 1–11.
22. Taherzadeh, M. J., Karimi, K. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A review. *International Journal of Molecular Sciences*. 2008. Vol. 9, No 9. P. 1621–1651.
23. Mosier, N. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass / N. Mosier, C. Wyman, B. Dale et al. *Bioresource Technology*. 2005. Vol. 96, No 6. P. 673–686.
24. Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., Negro, M. J. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. *Bioresource Technology*. 2010. Vol. 101, No 13. P. 4851–4861.
25. Hendriks, A. T. W. M., Zeeman, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100, No 1. P. 10–18.
26. Kaur, R., Arora, S., Gill, P. Valorization of fruit and nut shells for bioethanol production. *Renewable Energy*. 2014. Vol. 62. P. 94–102.
27. (Джерело відсутнє)

28. Zhang, Y., Ezeji, T. C., Qureshi, N. Pretreatment of lignocellulosic biomass for ethanol production. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2009. Vol. 82. P. 815–828.

29. Доступ до ресурсу: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/5/1048>.

30. Доступ до ресурсу: <https://www.frontiersin.org/journals/chemistry/articles/10.3389/fchem.2018.00141/full>.

31. Halysh, V., Romero-García, J. M., Vidal, A. M., Kulik, T., Palianytsia, B., García, M., & Castro, E. (2023). Apricot seed shells and walnut shells as unconventional sugars and lignin sources. *Molecules*, 28(3), 1455.

32. X., Y., Z. Apricot SeedShells and Walnut Shells as Unconventional Sugars and Lignin Sources. *Journal of Biomass*. 2023. Vol. 1. P. 100–110.

33. Xu P., Zhang Y., Wang Z., et al. Natural variation of lignocellulosic components in *Miscanthus* biomass: effects of genetic and environmental factors // *Frontiers in Chemistry*. 2020. Vol. 8.

34. *Маркетинг стартап-проектів* : навч. посіб. для усіх спеціальностей другого освітнього ступеня «магістр» / С. О. Солнцев та ін. ; за заг. ред. С. О. Солнцева ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 218 с.

35. *Розроблення стартап-проекту* : метод. рек. до виконання розділу магістер. дисертацій для студ. інженер. спеціальностей / за заг. ред. О. А. Гавриша. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.

36. Semeniuk, S. Overcoming barriers to digitalization of small and medium-sized enterprises under martial law / S. Semeniuk, V. Levytskyi, O. Fomina et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 3, No 13(129). P. 57–69.

37. Yudina, N. V. Methods of the Startup-Project Developing Based on “the Four-Dimensional Thinking” in Information Society. *Marketing and Management of Innovations*. 2017. No 3. P. 245–256.

38. Yudina, N. Economic “Butterfly” and Futurology of the War in Ukraine. *Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*. 2022. No 23. P. 77–82.

39. Yudina, N. Algorithm of Marketing Decision Making. *Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*. 2022. No 22. P. 1–9.

ДОДАТОК. АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Збірник тез доповідей XXXVII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів"

UDC 676

PRETREATMENT OF WALNUT SHELLS AND APRICOT KERNELS FOR POLYSACCHARIDE ISOLATION

Student Daniil Dragan, Assoc. Prof. Vita Halys

¹ – Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,

² – Chuiko Institute of Surface Chemistry of NASU

ABSTRACT: *This paper presents a simple and efficient pretreatment approach for walnut shell and apricot kernels biomass to enable their subsequent conversion into second-generation bioethanol. The study evaluates two pretreatment strategies aimed at disrupting the lignocellulosic matrix and increasing polysaccharide accessibility.*

KEY WORDS: SHELLS, CELLULOSE, LIGNIN, SUBSTRATE

РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ У ВИРОБНИЦТВІ ПАПЕРУ ТА КАРТОНУ З МАКУЛАТУРИ

Студент Данііл Драган, доцент Віта Галиш

¹ – КПІ ім. Ігоря Сікорського,

² – Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка, НАНУ

АНОТАЦІЯ: *У цій статті представлено простий та ефективний підхід до попередньої обробки біомаси шкаралупи волоських горіхів та кісточок абрикоса для забезпечення їх подальшого перетворення на біоетанол другого покоління. У дослідженні оцінюються дві стратегії попередньої обробки, спрямовані на руйнування лігноцелюлозної матриці та підвищення доступності полісахаридів.*

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ШКАРАЛУПИ, ЦЕЛЮЛОЗА, ЛІГНІН, СУБСТРАТ

The growing global demand for sustainable and renewable energy sources has intensified interest in the production of second-generation biofuels. Unlike first-generation biofuels, which rely on food-grade raw materials, second-generation

biofuels are derived from lignocellulosic agricultural residues and non-edible biomass [1]. Among the various types of biomass suitable for bioethanol production, agricultural residues represent an abundant and underutilized resource [2]. Walnut shells and apricot kernel, generated in significant quantities by the agro-industrial sector, are rich in polysaccharides which can be converted into fermentable sugars through appropriate pretreatment. Utilizing these residues not only offers an effective waste-management strategy but also contributes to a circular bioeconomy by transforming low-value by-products into high-value renewable energy.

Therefore, the development of efficient and simple pretreatment methods for walnut shells and apricot pits is essential for enhancing the accessibility of their polysaccharide components and improving the overall efficiency of second-generation bioethanol production. The purpose of the work is to evaluate the efficiency of acid hydrolysis and alkaline treatment methods, determine their impact on biomass structure. For the biomass samples examined, the efficiency of acid and alkaline pretreatments varied slightly, which can be attributed to their initial chemical composition (Fig. 1). Apricot shells exhibited a higher lignin content and therefore showed lower susceptibility to chemical action by the reagents.

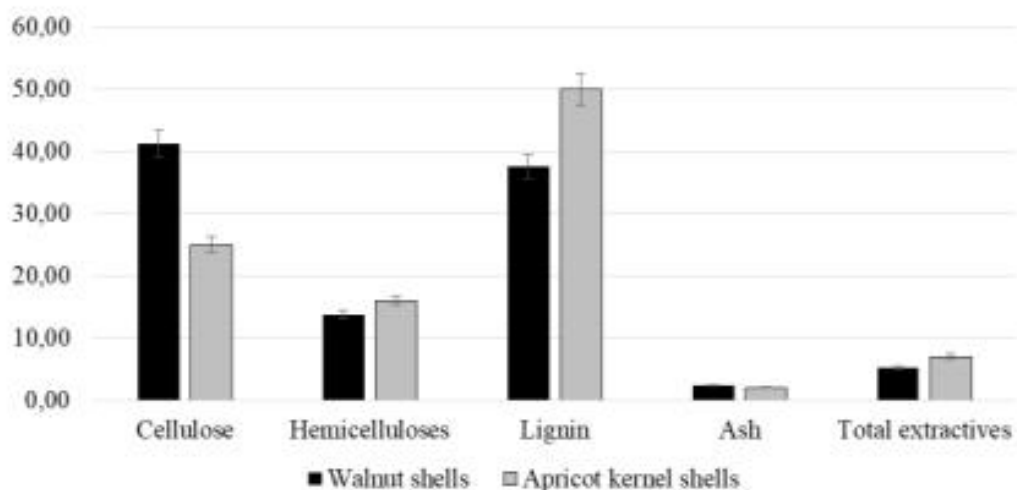


Figure 1 – Chemical composition of walnut shells and apricot kernel shells.

Pretreating apricot seed shells and walnut shells with 1% H_2SO_4 at 180 °C resulted in weight losses of 37.5% and 50.4%, respectively, indicating substantial removal of hemicellulosic components. The substrate obtained after this acid treatment were enriched in lignin, suggesting that the lignocellulosic structure became more recalcitrant due to the relative increase in lignin content. Subsequent alkali pretreatment of the same materials using 15% NaOH at 180 °C led to much higher mass losses, measuring 76.8% for apricot seed shells and 79.5% for walnut shells. These losses were primarily associated with extensive delignification, as the alkaline conditions effectively broke down lignin and solubilized a significant portion of it. Consequently, the lignin content in the treated solids decreased approximately sixfold for apricot seed shells and threefold for walnut shells compared to the untreated raw materials. Analysis of the solids after alkaline pretreatment revealed a high cellulose content, reflecting the selective removal of lignin and hemicellulose. Given this composition, it is expected that the cellulose present in these pretreated solids will be most efficiently hydrolyzed to glucose, highlighting the potential of alkaline pretreatment to enhance the enzymatic digestibility of these lignocellulosic residues.

Therefore, acid pretreatment facilitates partial hydrolysis of hemicelluloses, while alkaline treatment promotes lignin removal and structural swelling of the biomass. The effectiveness of both methods is assessed in terms of polysaccharide release, structural modification, and suitability for further enzymatic saccharification and fermentation. The proposed pretreatment approaches offer a cost-effective pathway for upgrading agricultural waste into valuable biofuels, contributing to sustainable resource utilization and circular bioeconomy development.

References:

1. Pant, R., Gupta, A., Pant, G., Chaubey, K. K., Kumar, G., & Patrick, N. (2023). Second-generation biofuels: Facts and future. In Relationship Between

1.

Збірник тез доповідей XXXVII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів"

Microbes and the Environment for Sustainable Ecosystem Services (pp. 97-115). Elsevier.

2. Halysh, V., Trus, I., Yashchenko, O., et al. (2025). From plant waste to substrate for second-generation biofuels. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 26(11).