

РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-322-330](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-322-330)

УДК 662:676.2

**Віта Василівна Галиш¹, Інна Миколаївна Трус², Ольга Василівна Яценко³,
Марина Олександрівна Громнадська⁴, Павло Романович Зубик⁵**

¹доктор технічних наук, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна);
доктор технічних наук,

науковий співробітник лабораторії кінетики та механізмів хімічних перетворень на поверхні твердих тіл
Інститут хімії поверхні імені О. О. Чуйка НАН України (Київ, Україна)

E-mail: v.galysh@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7063-885X>. **ResearcherID:** [I-4202-2016](https://orcid.org/0000-0001-7063-885X)

²доктор технічних наук, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: inna.trus.m@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-6368-6933>. **ResearcherID:** [I-3204-2017](https://orcid.org/0000-0001-6368-6933)

³кандидат технічних наук, провідний інженер кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: voliav1989@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3716-8707>. **ResearcherID:** [AAJ-9408-2020](https://orcid.org/0000-0003-3716-8707)

⁴доктор філософії, старший викладач кафедри промислової біотехнології та біофармації
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: hro.maryna@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8165-561X>. **ResearcherID:** [R-9377-2017](https://orcid.org/0000-0002-8165-561X)

⁵аспірант кафедри промислової біотехнології та біофармації
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: pv.zubyk@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0435-0254>

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛУЖНОЇ ОБРОБКИ ПШЕНИЧНОЇ СОЛОМИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОЕТАНОЛУ

Досліджено процес лужної обробки пшеничної соломи з метою вилучення полісахаридної фракції для подальшого перетворення на рідке біопаливо. Для встановлення впливу концентрації гідроксиду натрію (2-6 %) та тривалості обробки (30-150 хв) на ефективність делігніфікації реалізовано план повного факторного експерименту типу 2². Побудовано регресійні моделі процесу, перевірено їх адекватність статистичними критеріями Кохрена та Фішера. Встановлено, що підвищення концентрації лугу сприяє зменшенню вмісту лігніну, але супроводжується зниженням виходу твердої фракції, що свідчить про часткову втрату вуглеводної складової. Застосовано узагальнену функцію бажаності Харрінгтона для визначення оптимальних параметрів обробки (2,2 % розчин NaOH протягом 89 хв, функції бажаності – 0,6906).

Ключові слова: целюлозний продукт; делігніфікація; лігнін; біопаливо; біоетанол.

Рис.: 1. Табл.: 4. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Зростання населення планети та постійний промисловий розвиток спричиняють дедалі вищий попит на енергетичні ресурси. Це, у поєднанні з небезпекою кліматичних змін та обмеженості запасів викопних енергоресурсів, вимагає переходу до екологічно безпечних і відновлюваних джерел енергії. Одним із перспективних рішень є біопаливо другого покоління, що виробляється з нехарчової біомаси [1]. Таке паливо здатне зменшити залежність від традиційних енергоносіїв і скоротити обсяг парникових викидів. На відміну від біопалива першого покоління, воно не створює конкуренції з аграрним виробництвом, а отже, є більш дружнім до довкілля варіантом [2].

Сільськогосподарські залишки та побічні продукти агровиробництва становлять величезний, проте значною мірою недооцінений і неефективно використовуваний ресурс. У багатьох випадках такі матеріали піддаються спаленню або просто залишаються на полях для природного розкладання, що супроводжується викидом парникових газів, зокрема метану та вуглекислого газу, а також погіршенням стану ґрунтів та атмосферного повітря. Ігнорування потенціалу цієї сировини не лише втрата з погляду енергетики, а й чинник негативного впливу на довкілля [3; 4].

Раціональне використання агровідходів шляхом їх перетворення на альтернативні види палива, зокрема біоетанол, відповідає сучасним тенденціям сталого розвитку, сприяє зменшенню залежності від викопних джерел енергії, а також впровадженню принципів циркулярної економіки, де відходи розглядаються як вторинна сировина для створення нових цінних продуктів.

Постановка проблеми. Одним із найперспективніших джерел для виробництва біопалива є лігноцелюозна біомаса – структурний компонент рослин, що складається переважно з трьох структурних полімерів: целюлози, геміцелюлози та лігніну. До складу також входять у незначних кількостях екстрактивні компоненти та зольні елементи. З целюлози й геміцелюлоз за допомогою гідролізу можна отримати цукри, придатні для подальшого зброджування в біоетанол [5].

Однак ефективне використання лігноцелюозної сировини стикається з рядом технологічних викликів. Її природна стійкість зумовлена складною та щільною структурою, де лігнін виконує роль захисного бар'єра, інкапсулюючи вуглеводні полімери та ускладнюючи доступ ферментів до целюлози й геміцелюлоз. Крім того, лігнін та продукти його розпаду можуть інгібувати дію ферментів та мікроорганізмів, що беруть участь у процесі ферментації, знижуючи загальний вихід цільового продукту [6].

З огляду на це, ключовим етапом у технології біоетанолу з лігноцелюозної біомаси є стадія попередньої обробки, метою якої є деструкція структури сировини, зниження вмісту лігніну, підвищення доступності полісахаридів до дії гідролітичних ферментів [7]. Успішна реалізація цієї стадії безпосередньо впливає на ефективність усього виробничого процесу та кінцеву продуктивність перетворення [8; 9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні розроблено широкий спектр методів такої обробки, які поділяються на фізичні (механічне подрібнення, термічне впливання), хімічні (кислотна чи лужна обробка), біологічні (використання ферментів або мікроорганізмів), а також комбіновані фізико-хімічні технології [10].

Серед усього розмаїття підходів лужна обробка, зокрема з використанням гідроксиду натрію, вважається однією з найефективніших та економічно обґрунтованих технологій. Вона забезпечує видалення лігніну зі структури біомаси, зберігаючи при цьому цілісність вуглеводної фракції. Завдяки цьому підвищується ефективність ферментативного гідролізу та загальний вихід цукрів, придатних для зброджування у біоетанол [11; 12]. Крім того, лужна попередня обробка має вагомні переваги: відносно м'які умови проведення, можливість повторного використання реагентів [13; 14]. Це робить її привабливою не лише для лабораторного, але і для промислового застосування в технологіях виробництва біопалива з агровідходів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри отримані результати щодо лужної обробки рослинних відходів агропромислового комплексу, подальшого вивчення потребують питання збереження полісахаридної фракції під час інтенсивної делігніфікації. Недостатньо досліджено вплив лужних реагентів на вихід і якість целюлозних продуктів.

Метою роботи є дослідження лужної обробки соломи пшениці для вилучення її полісахаридної складової для подальшого перетворення на рідке біопаливо.

Виклад основного матеріалу досліджень. Для проведення дослідження як вихідну сировину використано солону пшениці врожаю 2024 року, зібрану на полях Київської області. Сировину було подрібнено до розмірів 15-20 мм для забезпечення однорідності та ефективності подальших процесів. Подрібнений матеріал зберігався в ексікаторах для

підтримки постійного рівня вологості. Аналіз хімічного складу вихідної сировини здійснювався відповідно до загальноприйнятих стандартних методик [15]. Детальний хімічний склад вихідної соломи представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад соломи пшениці

Компоненти	Вміст, %
Целюлоза	37,0
Холоцелюлоза	67,2
Лігнін	19,1
Смоли, жири, воски	4,8
Речовини, що екстрагуються гарячою водою	11,5
Речовини, що екстрагуються 1 % NaOH	38,0
Зольність	7,0

Джерело: розроблено авторами.

У межах дослідження можливості виділення полісахаридної складової солому піддавали двостадійній обробці розчином гідроксиду натрію. Концентрація лужного розчину варіювалася в діапазоні 2-6 %, гідромодуль підтримувався на рівні 5:1, а температура обробки становила 120 °С. Тривалість обробки варіювалася від 30 до 150 хвилин. Експерименти проводилися в лабораторних умовах із використанням сталевих кислотостійких автоклавів об'ємом 0,5 дм³. У кожен автоклав завантажували 40 г абсолютно сухої подрібненої соломи, після чого додавали відповідний об'єм розчину гідроксиду натрію. Автоклави розміщували в попередньо нагрітій до заданої температури гліцериновій бані, обладнаній механічним перемішувальним пристроєм для забезпечення рівномірного нагріву.

Після завершення процесу обробки та охолодження отриманий целюлозний продукт піддавався віджиманню для відділення відпрацьованого лужного розчину. Відпрацьований розчин збирався в окремі ємності для подальшого аналізу, а целюлозний продукт ретельно промивали дистильованою водою, після чого визначали його вихід та вміст у ньому залишкового лігніну.

З метою встановлення оптимальних умов вилучення гексозовмісної фракції з лігноцелюлозної сировини було реалізовано план повного факторного експерименту (ПФЕ) типу 2². У ході дослідження як незалежні змінні (фактори) було обрано:

- x_1 – концентрація лугу (%);
- x_2 – тривалість лужної обробки (хв).

Ці параметри було визначено як ключові впливові чинники, що формують якісні та кількісні характеристики кінцевого продукту. У ролі залежних змінних (функцій відгуку, y_i) були обрані такі показники целюлозних продуктів:

- y_1 – вихід целюлозного продукту, %;
- y_2 – вміст залишкового лігніну, %.

Вихідні значення для побудови матриці планування ПФЕ типу 2², зокрема рівні варіювання факторів та інтервали їх змін, наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Рівні варіювання та кодування незалежних факторів x_i

Фактори (x_i)	Рівні варіювання факторів			Інтервал варіювання (Δx_i)
	(+1)	(-1)	(0)	
x_1 – концентрація NaOH, %	6	2	4	2
x_2 – тривалість варіння, хв	150	30	90	30

Джерело: розроблено авторами.

Для математичного опису процесу та подальшого визначення впливу окремих факторів було побудовано математичні моделі у вигляді поліномів другого порядку. Моделювання, ідентифікація, а також статистична перевірка адекватності моделей здійснювалися

із використанням програмного забезпечення. Окрім цього, на основі отриманих моделей проведено багатокритеріальну оптимізацію з метою виявлення оптимального поєднання параметрів процесу, що забезпечують максимальний вихід продукту за мінімального вмісту лігніну.

Загальний вигляд рівняння регресії для двох незалежних змінних у формі полінома другого порядку має такий вигляд:

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2, \quad (1)$$

де y_i – залежна змінна (вихід або вміст лігніну), x_1, x_2 – незалежні змінні (фактори), b_0 – b_5 – коефіцієнти регресії, які визначають вплив відповідних членів моделі.

Оптимізація умов лужної обробки для отримання целюлозовмісної продукції здійснювалася із використанням методу багатокритеріальної оцінки на основі узагальненої функції бажаності Харрінгтона. Значення кожної з досліджуваних залежних змінних y_i було трансформовано у відповідні функції бажаності d_i , значення яких змінюються в інтервалі від 0 до 1. При цьому шкала інтерпретується наступним чином: від $d = 0,00$ – $0,20$ – «дуже погано» до $d = 0,81$ – $1,00$ – «дуже добре».

Для оцінювання загального рівня оптимальності варіанту використовували узагальнену функцію бажаності D , яку обчислювали як середнє геометричне індивідуальних бажаностей:

$$D = \sqrt{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \cdot d_4 \cdot d_5}. \quad (2)$$

Для дослідження було використано однобічні профілі бажаності Харрінгтона, тобто було встановлено чітке спрямування зміни показників: наприклад, максимізація виходу та мінімізація вмісту лігніну. Такий підхід дозволяє враховувати специфіку кожного критерію з урахуванням його впливу на якість кінцевого продукту.

Процедуру пошуку оптимальних значень технологічних параметрів, зокрема концентрації луку та тривалості варіння, виконували методом сканування (покрокового перебору) з високою точністю. Значення незалежних змінних варіювали в межах експериментального простору з кроком 0,001, що дало змогу з високою деталізацією виявити область глобального максимуму узагальненої функції бажаності.

Матриця планування експерименту та результати досліджень для двох незалежних факторів наведені у таблиці 2. Значення вихідних параметрів y_i у таблиці представлені у вигляді середніх арифметичних, розрахованих за результатами трьох паралельних дослідів, що забезпечує достовірність отриманих даних.

Таблиця 2 – Матриця планування експерименту для двох факторів у повному факторному експерименті типу 2^2

Параметри обробки		Значення показників целюлозних продуктів	
x_1 натуральне значення (кодоване)	x_2 натуральне значення (кодоване)	y_1	y_2
2 (-1)	30 (-1)	35,8	19,2
	90 (0)	29,5	14,1
	150 (1)	25,9	13,0
4 (0)	30 (-1)	31,1	16,6
	90 (0)	26,6	13,3
	150 (1)	23,9	12,0
6 (1)	30 (-1)	28,0	16,3
	90 (0)	21,9	13,1
	150 (1)	21,2	11,8

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз результатів свідчить про те, що підвищення концентрації гідроксиду натрію у розчині з 2 до 4 % за умов варіювання тривалості процесу від 30 до 150 хвилин сприяє активізації процесів делігніфікації. Це підтверджується зменшенням вмісту залишкового лігніну на 7,2 %, що вказує на ефективне руйнування лігнінового компонента у структурі лігноцелюлозної біомаси.

Разом з тим, спостерігається зниження загального виходу твердої фракції на 11,9 %, що, ймовірно, пов'язано не лише з вилученням лігніну, а й з екстракцією супутніх компонентів – екстрактивних речовин та мінеральних домішок.

Подальше збільшення концентрації луку до 6 % за аналогічних умов тривалості обробки (30...150 хв) зумовлює додаткове зниження вмісту лігніну ще на 4,8 %. Однак у цьому випадку також фіксується зменшення виходу твердої фракції на 9,9 %. Це свідчить про те, що на більш високих концентраціях луку, крім реакцій делігніфікації, інтенсифікуються процеси руйнування низькомолекулярних полісахаридів, що входять до складу геміцелюлози та частково целюлози, що негативно впливає на масу залишкової твердої фази. Отже, надмірне підвищення концентрації NaOH може призводити не лише до глибшого видалення лігніну, а й до небажаних втрат вуглеводної фракції, що має бути враховано під час оптимізації умов обробки.

Обробку експериментальних результатів та побудову математичних моделей процесу варіння біомаси в лужному середовищі було здійснено із застосуванням методу найменших квадратів. Цей метод забезпечив визначення числових значень коефіцієнтів регресії, що найкраще апроксимують залежності між незалежними змінними (факторами) та функціями відгуку. Отримані рівняння регресії описують ефективність лужної обробки пшеничної соломи із задовільною точністю. Для перевірки адекватності побудованих моделей було використано критерії Кохрена (на перевірку однорідності дисперсій) та Фішера (на відповідність моделі експериментальним даним). За результатами статистичної обробки встановлено, що моделі відповідають умовам адекватності та можуть бути використані для подальшого аналізу й оптимізації процесу.

Числові значення регресійних коефіцієнтів, що входять до рівнянь математичних моделей, наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів рівнянь регресії для показників процесу лужної обробки пшеничної соломи

Коефіцієнти рівняння регресії	Показники	
	y_1	y_2
b_0	44,21	25,32
b_1	- 1,96	- 1,98
b_2	- 0,17	- 0,12
b_3	- 0,14	0,15
b_4	0,006	0,004
b_5	0,0004	0,0004

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз значущості регресійних коефіцієнтів показав, що коефіцієнти b_4 та b_5 , які відповідають квадратичним ефектам факторів x_1^2 та x_2^2 , в обох випадках є статистично незначущими. Їхні значення не перевищують критичних рівнів згідно з t-критерієм Стьюдента, що свідчить про відсутність суттєвого впливу квадратичних компонентів на результати дослідження у межах досліджуваного інтервалу факторів. У зв'язку з цим, зазначені коефіцієнти можуть бути виключені з рівнянь регресії, що спрощує модель без втрати її адекватності.

Задача визначення оптимальних технологічних параметрів лужної обробки пшеничної соломи має багатокритеріальний характер, оскільки потребує одночасного врахування кількох якісних показників отриманого продукту, таких як вихід целюлозного продукту та вміст у ньому лігніну. Тому було використано метод узагальненої функції бажаності Харрінгтона.

Кожен із показників було трансформовано у шкалу бажаності, яка дозволяє оцінити ступінь відповідності значення конкретного параметра бажаному рівню. Значення бажаності змінювалися в діапазоні від 0 (абсолютно неприйнятний результат) до 1 (максимально бажаний результат), що дозволяє порівнювати різні показники між собою, незалежно від їхніх фізичних одиниць. Шкала бажаності для кожного з показників u_i , а також результати оптимізації технологічних параметрів, наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Шкала бажаності для показників якості целюлозних продуктів

Показник u_i	Шкала бажаності		Значення в точці оптимуму
	Дуже добре	Дуже погано	
Вихід, %	35,8	21,2	29,072
Вміст лігніну, %	11,8	19,2	14,404

Джерело: розроблено авторами.

За результатами проведених розрахунків встановлено, що оптимальними умовами лужного оброблення пшеничної соломи є використання розчину NaOH концентрацією 2,2 % та тривалість процесу 89 хвилин. Саме за цих технологічних параметрів спостерігається максимальне значення узагальненої функції бажаності за Харрінгтоном, яке дорівнює 0,6906, що свідчить про задовільний баланс між основними показниками якості обробленої сировини. Це дозволяє рекомендувати вказані параметри як раціональні для практичного впровадження в умовах промислової або напівпромислової переробки біомаси.

Компромісну область параметрів, у якій досягається високий рівень бажаності за всіма якісними показниками u_i , представлено на площині технологічних факторів x_1 та x_2 на рисунку 1. Вона демонструє зону технологічної стабільності, де незначні відхилення параметрів не призводять до суттєвого погіршення характеристик кінцевого продукту.

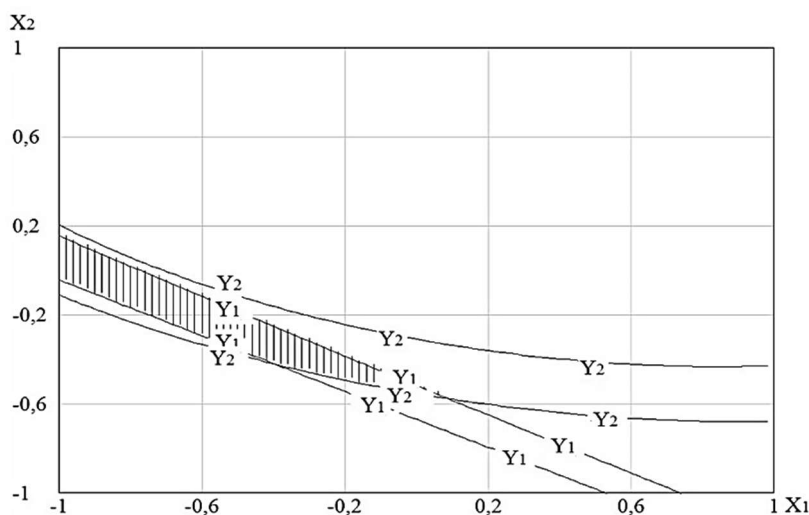


Рис. 1. Область компромісних значень параметрів лужної обробки пшеничної соломи
Джерело: розроблено авторами.

Отримані результати демонструють перспективність застосування технології лужної обробки для ефективної переробки твердих рослинних відходів сільськогосподарського походження, які щороку утворюються у значних обсягах. Зокрема, підтверджена доцільність використання пшеничної соломи як сировини для одержання целюлозовмісних

продуктів. Такі продукти можуть бути використані як субстрати для подальшого біотехнологічного перетворення, зокрема у процесах ферментативного гідролізу з метою отримання біоетанолу.

Одержані експериментальні дані ляжуть в основу наступного етапу досліджень, що буде присвячено оптимізації параметрів ензимного розщеплення целюлозних матеріалів та підвищенню виходу цукрів, придатних до подальшого зброджування.

Висновки. Проведено дослідження впливу концентрації гідроксиду натрію та тривалості лужної обробки пшеничної соломи на ефективність делігніфікації та вихід целюлозного продукту для подальшого її біотехнологічного перетворення на рідке біопаливо. За результатами повного факторного експерименту типу 2^2 побудовано математичні моделі процесу у вигляді поліномів другого порядку. Статистична обробка підтвердила адекватність моделей експериментальним даним.

Встановлено, що підвищення концентрації NaOH до 6 % знижує вміст лігніну, проте супроводжується значними втратами твердої фракції, зумовленими руйнуванням геміцелюлоз та частково целюлози. Це може негативно впливати на загальний вихід полісахаридів для подальшої біоетанольної конверсії.

Для забезпечення оптимального балансу між ефективністю вилучення лігніну та збереженням вуглеводної складової проведено оптимізацію параметрів із використанням методу узагальненої функції бажаності Харрінгтона. Найбільш доцільними умовами обробки визначено концентрацію NaOH 2,2 % і тривалість 89 хв, за яких забезпечується найкращий баланс між ефективністю делігніфікації та збереженням вуглеводної фракції.

Отримані результати підтверджують перспективність застосування лужної обробки для підготовки лігноцелюлозної біомаси до біотехнологічного перетворення, зокрема у виробництві біоетанолу.

Список використаних джерел

1. Hirani, A. H., Javed, N., Asif, M., Basu, S. K., & Kumar, A. (2018). A review on first- and second-generation biofuel productions. *Biofuels: Greenhouse Gas Mitigation and Global Warming: Next Generation Biofuels and Role of Biotechnology*, 141-154.
2. 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.
3. Trembus, I., & Mykhailenko, N. (2024). Resource-saving wheat straw processing technology. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 59(3), 585-590.
4. Barbash, V. A., Yashchenko, O. V., Yakymenko, O. S., & Myshak, V. D. (2023). Extraction, properties and use of nanocellulose from corn crop residues. *Applied Nanoscience*, 13(12), 7455-7468.
5. Bajpai, P. (2016). Structure of lignocellulosic biomass. In *Pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuel production* (pp. 7–12). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0687-6_2.
6. Yuan, Y., Jiang, B., Chen, H., Wu, W., Wu, S., Jin, Y., & Xiao, H. (2021). Recent advances in understanding the effects of lignin structural characteristics on enzymatic hydrolysis. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1), 205.
7. Jain, S., Kumar, S. (2024). Advances and challenges in pretreatment technologies for bioethanol production: A comprehensive review. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 100053.
8. Zhao, L., Sun, Z. F., Zhang, C. C., Nan, J., Ren, N. Q., Lee, D. J., et al. (2022). Advances in pretreatment of lignocellulosic biomass for bioenergy production: challenges and perspectives. *Bioresource Technology*, 343, 126123.
9. Beig, B., Riaz, M., Naqvi, S. R., Hassan, M., Zheng, Z., Karimi, K., et al. (2021). Current challenges and innovative developments in pretreatment of lignocellulosic residues for biofuel production: A review. *Fuel*, 287, 119670.
10. Rusănescu, C. O., Ciobanu, M., Rusănescu, M., Dinculoiu, R. L. (2024). Pretreatments applied to wheat straw to obtain bioethanol. *Appl. Sci.*, 14(4), 1612.

11. Sun, S., Zhang, L., Liu, F., Fan, X., Sun, R. C. (2018). One-step process of hydrothermal and alkaline treatment of wheat straw for improving the enzymatic saccharification. *Biotechnol. Biofuels*, 11(1), 137.
12. Shah, T. A., Khalid, S., Nafidi, H. A., Salamatullah, A. M., Bourhia, M. (2023). Sodium hydroxide hydrothermal extraction of lignin from rice straw residue and fermentation to biomethane. *Sustain.*, 15(11), 8755.
13. Abolore, R. S., Jaiswal, S., & Jaiswal, A. K. (2024). Green and sustainable pretreatment methods for cellulose extraction from lignocellulosic biomass and its applications: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 7, 100396.
14. Kim, J. S., Lee, Y. Y., & Kim, T. H. (2016). A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*, 199, 42-48.
15. Barbash, V., Poyda, V., & Deykun, I. (2011). Peracetic acid pulp from annual plants. *Cellulose chemistry and Technology*, 45(9), 613.

References

1. Hirani, A. H., Javed, N., Asif, M., Basu, S. K., & Kumar, A. (2018). A review on first- and second-generation biofuel productions. *Biofuels: Greenhouse Gas Mitigation and Global Warming: Next Generation Biofuels and Role of Biotechnology*, 141-154.
2. 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.
3. Trembus, I., & Mykhailenko, N. (2024). Resource-saving wheat straw processing technology. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 59(3), 585-590.
4. Barbash, V. A., Yashchenko, O. V., Yakymenko, O. S., & Myshak, V. D. (2023). Extraction, properties and use of nanocellulose from corn crop residues. *Applied Nanoscience*, 13(12), 7455-7468.
5. Bajpai, P. (2016). Structure of lignocellulosic biomass. In *Pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuel production* (pp. 7–12). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0687-6_2.
6. Yuan, Y., Jiang, B., Chen, H., Wu, W., Wu, S., Jin, Y., & Xiao, H. (2021). Recent advances in understanding the effects of lignin structural characteristics on enzymatic hydrolysis. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1), 205.
7. Jain, S., Kumar, S. (2024). Advances and challenges in pretreatment technologies for bioethanol production: A comprehensive review. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 100053.
8. Zhao, L., Sun, Z. F., Zhang, C. C., Nan, J., Ren, N. Q., Lee, D. J., et al. (2022). Advances in pretreatment of lignocellulosic biomass for bioenergy production: challenges and perspectives. *Bioresource Technology*, 343, 126123.
9. Beig, B., Riaz, M., Naqvi, S. R., Hassan, M., Zheng, Z., Karimi, K., et al. (2021). Current challenges and innovative developments in pretreatment of lignocellulosic residues for biofuel production: A review. *Fuel*, 287, 119670.
10. Rusănescu, C. O., Ciobanu, M., Rusănescu, M., Dinculoiu, R. L. (2024). Pretreatments applied to wheat straw to obtain bioethanol. *Appl. Sci.*, 14(4), 1612.
11. Sun, S., Zhang, L., Liu, F., Fan, X., Sun, R. C. (2018). One-step process of hydrothermal and alkaline treatment of wheat straw for improving the enzymatic saccharification. *Biotechnol. Biofuels*, 11(1), 137.
12. Shah, T. A., Khalid, S., Nafidi, H. A., Salamatullah, A. M., Bourhia, M. (2023). Sodium hydroxide hydrothermal extraction of lignin from rice straw residue and fermentation to biomethane. *Sustain.*, 15(11), 8755.
13. Abolore, R. S., Jaiswal, S., & Jaiswal, A. K. (2024). Green and sustainable pretreatment methods for cellulose extraction from lignocellulosic biomass and its applications: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 7, 100396.
14. Kim, J. S., Lee, Y. Y., & Kim, T. H. (2016). A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*, 199, 42-48.
15. Barbash, V., Poyda, V., & Deykun, I. (2011). Peracetic acid pulp from annual plants. *Cellulose chemistry and Technology*, 45(9), 613.

Vita Halys¹, Inna Trus², Olha Yashchenko³, Maryna Hromnadska⁴, Pavlo Zubik⁵

¹Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine);
Doctor of Technical Sciences, Researcher, Laboratory of Kinetics and Mechanisms of Chemical Transformations on the Surface of Solids, Chuiko Institute of Surface Chemistry, NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: v.galys@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7063-885X>. **ResearcherID:** I-4202-2016

²Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: inna.trus.m@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6368-6933>. **ResearcherID:** I-3204-2017

³PhD in Technical Sciences, Lead Engineer of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: voliav1989@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3716-8707>. **ResearcherID:** AAJ-9408-2020

⁴Doctor of Philosophy, Senior Lecturer of Department of Industrial Biotechnology and Biopharmacy National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: hro.maryna@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8165-561X>. **ResearcherID:** R-9377-2017

⁵Postgraduate student of Department of Industrial Biotechnology and Biopharmacy National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: pv.zubik@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0435-0254>

RESEARCH ON THE EFFICIENCY OF ALKALINE TREATMENT OF WHEAT STRAW FOR BIOETHANOL PRODUCTION

The study explores the alkaline treatment of wheat straw aimed at extracting its polysaccharide fraction for subsequent conversion into liquid biofuel. Wheat straw harvested in 2024 from the Kyiv region of Ukraine was used as raw material. The research is grounded in the understanding that lignocellulosic biomass represents one of the most promising sources of renewable carbon that does not compete with food resources. Due to its high cellulose content and wide availability, wheat straw stands out as a strategic feedstock for bioenergy production.

The comprehensive review of scientific literature and recent studies on alkaline pretreatment of wheat straw for liquid biofuel production has revealed a significant research gap, i.e.: the preservation of the polysaccharide fraction during intense delignification has received insufficient attention. This raises concerns regarding substantial losses of carbohydrate content, which in turn negatively affects the overall efficiency of biotechnological conversion processes.

The primary objective of the paper is to investigate the conditions of alkaline treatment of wheat straw to optimize the recovery of its polysaccharide fraction as a precursor for bioethanol production. A full factorial experimental design (2² type) was implemented to assess the effects of sodium hydroxide concentration (2–6%) and treatment duration (30–150 minutes) on the efficiency of lignin removal. Regression models describing the process were constructed and validated using Cochran's and Fisher's statistical tests for adequacy.

The study establishes for the first time that an increase in alkali concentration leads to reduction in lignin content; however, it also results in the decrease in solid fraction yield, indicating partial loss of the carbohydrate component. To determine optimal conditions for treatment, Harrington's desirability function was applied. The optimal parameters were identified as treatment with a 2.2 % NaOH solution for 89 minutes, which corresponded to the highest desirability function value of 0.6906.

The findings confirm the feasibility of utilizing wheat straw as a viable raw material for bioethanol production and provide a basis for further research into the optimization of enzymatic hydrolysis of cellulose-containing products. The developed approach contributes to the advancement of sustainable biofuel technologies based on non-food lignocellulosic feedstocks.

Keywords: cellulosic product; delignification; lignin; biofuel; bioethanol.

Fig.: 1. Table: 4. References: 15.