**Данілова К.О.**

К.Т.Н., С.Н.С.

*Інститут продовольчих
ресурсів НААН України***Левандовський Л.В.**

Д.Т.Н., професор

Соломон А.М.

К.Т.Н., доцент

*Вінницький національний
аграрний університет***Danilova K.**Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher*Institute of Food Resources
NAAS of Ukraine***Levandovskiy L.**Doctor of Technical Sciences,
Professor**Solomon A.**Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor*Vinnitsia National Agrarian
University***УДК 663.52****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-3-15****ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ
ВИКОРИСТАННЯ
НЕПРОДОВОЛЬЧОЇ СИРОВИНИ
БОРОШНОМЕЛЬНОГО
ВИРОБНИЦТВА ДЛЯ БІОКОНВЕРСІЇ
В ЕТАНОЛ**

Визначальним фактором ефективності виробництва етилового спирту з крохмалеемісної сировини є глибина та повнота гідролізу крохмалю і структурних вуглеводів до моноцукрів із використанням ферментних препаратів мікробного походження. Рівень використання крохмалю та целюлози, введених у технологічний процес, значною мірою залежить від збереження ферментативної активності, що визначається параметрами підготовки сировини до гідролізу, кислотністю середовища та температурними режимами обробки.

Перед проведенням ферментативного гідролізу сусло підкислювали до рН 5,0–5,2 сірчаною кислотою, після чого здійснювали його розрідження амілолітичними ферментами за температури 75 °С. У процесі розрідження відбувалася часткова делігніфікація целюлозовмісної складової кукурудзяних відходів унаслідок кислотного гідролізу, що сприяло вивільненню целюлози та підвищенню її доступності для подальшого ферментативного перетворення. Гідроліз целюлози целюлолітичними ферментними препаратами проводили після стадії розрідження за температури 50 °С.

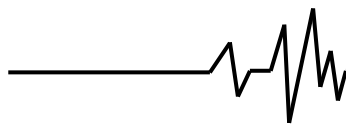
Оцукрення та ферментацію сусла здійснювали за режимом SSCF, що забезпечило зниження енерговитрат за рахунок зменшення температури розрідження, скорочення витрат ферментних препаратів внаслідок збереження їх активності, а також більш повне використання целюлозовмісної фракції сировини. У результаті підвищувалася концентрація зброджуваних цукрів та ефективність спиртового бродіння. Вихід етилового спирту при зброджуванні кукурудзяних відходів за запропонованими режимами становив 68 дал/т сировини, що на 2,9 дал/т перевищує показники, отримані за класичних умов розрідження при температурі 90 °С без застосування целюлази.

Отримані результати можуть бути використані при розробці енергоощадних технологій переробки крохмалеемісної сировини в спиртовій промисловості.

Ключові слова: кукурудзяні відходи, етиловий спирт, гідроліз, амілолітичні та целюлолітичні ферменти, ферментація.

Вступ. За економічними прогнозами ринок етанолу суттєво розшириться в найближчі роки. Зокрема, обсяг світового ринку етанолу в

минулому році становив 109,1 мільярда доларів США і очікується, що він досягне приблизно 182,88 мільярда доларів США до 2034 року,



збільшуючись із середньорічним темпом зростання на 5,3% з 2024 по 2034 рік [1]. З географічної точки зору, ринок етанолу завоює Північна Америка завдяки сприятливій державній політиці щодо виробництва та використання етанолу як біопалива, а також зростаючій обізнаності щодо контролю за забрудненням навколишнього середовища, спричиненим використанням традиційних видів палива в країнах цього регіону. В умовах постійно зростаючих потреб суспільства з виробництва етанолу, вирішенню таких питань, як підвищення ефективності використання сільськогосподарської сировини, збільшення виходу готового продукту і продуктивності (The ethanol yield and productivity) лежить в площині створення ресурсозберігаючих технологій.

Спиртова промисловість є матеріаломісткою, де витрати зерна на виробництво етилового спирту перевищують 60% загальних витрат на виробництво [2]. The alcohol industry is material-intensive, where the cost of grain on the production of ethyl alcohol exceeds 60% of the total production costs. (

Кукурудза – одна з найпопулярніших культур в Україні, зерно якої найбільше використовується для виробництва біоетанолу. Одним з шляхів раціональної організації його виробництва є використання всіх частин сировини, в тому числі зернових відходів.

Згідно встановленої нормативами класифікації відходи зернових розділяють на 3 категорії [3]:

- Відходи 1-ої категорії містять від 30 до 50% зерна, 10-30% борошняних витрясок та оббивний пил білого кольору;

- Зернові відходи 2-ої категорії містять 2-10% зерна, стрижні кукурудзи, лузга, полова та пил оббивний сірого кольору;

- Зернові відходи 3-ї категорії складаються із відходів з вмістом зерна до 2%, соломи, лузги, оббивного пилу чорного кольору та кукурудзяних обгорток.

Найоптимальнішим для виробництва біоетанолу є використання зернових відходів 1 і 2 категорії. Таким чином, дослідження технологічних аспектів переробки відходів борошномельного підприємства є актуальним з точки зору економії продовольчого зерна та використання вторинних сировинних ресурсів.

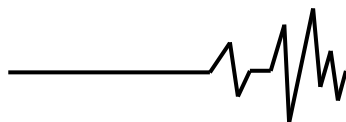
Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасній науковій літературі велика увага приділяється дослідженню технологічних параметрів і режимів переробки відходів зернового виробництва в етиловий спирт. Так, у роботі [4] досліджували оптимальні умови переробки борошна з пошкодженого зерна кукурудзи в етиловий спирт. Зазначається, що за рН 5,6, температури

бродіння 31°C і концентрації субстрату 14% через 48 годин утворилась максимальна концентрація етанолу 4,24 г/100 мл з продуктивністю етанолу 0,88 г/л/год.

Визначальним фактором ефективності виробництва етилового спирту з крохмалевмісної сировини є гідроліз крохмалю в моноцукри ферментними препаратами мікробного походження (5-8). Останнім часом в технології етилового спирту все більше застосовуються окрім традиційних амілолітичних ферментів, ферменти целюлолітичної дії [9-10]. Вони гідролізують лігноцелюлозу, яка міститься в оболонках відходів зернової сировини, до полісахаридів, які далі зброджуються спиртовими дріжджами. В літературі [11] описано метод гідролізу полісахаридів із відходів виробництва зернових культур із застосуванням амілази, глюкоамілази і ксиланази. Завдяки застосуванню комплексу ферментних препаратів вдалося збільшити вихід етанолу на 20-45%, зменшивши при цьому вміст вищих спиртів на 34 % і значно зменшивши концентрацію метанолу в порівнянні з еталонним зразком без препарату ксиланази. Максимальна концентрація етанолу, досягнута після ферментації житніх та пшеничних висівок, становила 44 г/л, а для зерна жита та пшениці – 73 та 69 г/л відповідно.

Відходи зернового виробництва мають в своєму складі крохмаль та целюлозовмісні компоненти, до яких відноситься оболонки зерна, залишки соломи і кукурудзяних початків. Для підвищення виходу спирту з кукурудзяних відходів застосовували попередню їх обробку для вивільнення целюлози, а далі проводили ферментативний гідроліз комплексом амілолітичних і целюлолітичних ферментів для утворення зброджуваних цукрів, які переробляли в етанол. В роботі [12] пропонувалось обробляти кукурудзяні відходи іонними рідинами, зокрема 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate, що сприяло відокремленню лігніну, а далі проводити ферментативний гідроліз комплексом амілолітичних і целюлолітичних ферментів і спиртове зброджування. В результаті збільшувалась кількість відновлюючих цукрів після гідролізу і підвищувався вихід біоетанолу.

Останнім часом виробництво біоетанолу здійснюється за методом одночасного оцукрювання та ферментації (SSCF - Simultaneous Saccharification and Co-Fermentation). Однак основною проблемою для SSCF є невідповідність оптимальних температур між ферментативним гідролізом і ферментацією [13-14]. Ферменти зазвичай працюють найефективніше при вищих температурах в діапазоні 45–55°C. Мікроорганізми, такі як дріжджі *Saccharomyces*



cerevisiae або бактерії, що перетворюють цукри в етанол, є чутливими до високих температур і мають оптимальний діапазон близько 30–37°C. Проведення процесу при компромісній температурі (38–42°C) призводить до зниження ефективності обох процесів: ферменти працюють повільніше, а мікроорганізми можуть відчувати стрес або навіть гинути. Вміст ферменту та вміст твердої речовини також є важливими факторами, які впливають на виробництво етанолу за допомогою SSCF. Крім того, щоб підтримувати стабільний pH у системі ферментативного гідролізу/ферментації під час реакції, більшість дослідників додають буферний розчин цитрату натрію, ацетату натрію або фосфату натрію для досягнення буферного ефекту. Однак додавання хімічних речовин не тільки збільшує витрати на виробництво, але й ускладнює розділення продукту на пізніх стадіях, що обмежує промислове застосування цієї техніки.

Дослідження активності ферментів в біологічній системі та вивчення впливу окремих факторів на перебіг ферментативного каталізу є предметом численних наукових досліджень [15-18]. Однак дані щодо ефективності гідролізу в умовах змінних параметрів, таких як температура, pH, активність та доза ферменту в практичній технології етилового спирту майже не враховується.

Метою роботи було дослідження технологічних аспектів використання непродовольчої сировини на прикладі кукурудзяних відходів для біоконверсії в етанол.

Матеріали та методи досліджень.

Кукурудзяні відходи



Кукурудзяні відходи було одержано з Зарубінського спиртового заводу, Тернопільська обл., Україна (рис.1).

Склад кукурудзяних відходів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Склад кукурудзяних відходів

Content	Indicator
---------	-----------

Лушпиння, %	30
Биті зерна, січка, %	40
Борошно, %	25
Полова (залишки соломи), %	5
Moisture, %	12.4
Умовна крохмалистість, % (поляриметричний метод)	63,2

Ферментні препарати

Рекомендації фірм-виробників ферментних препаратів стосовно оптимального діапазону температури і pH наведено в таблиці 2 [19].

Таблиця 2
Характеристика ферментних препаратів

Назва ферментного препарату	Виробник	Питома вага, г/см ³	Діапазон температури, °C	Діапазон pH
Амілекс 4Т	DuPont TM	1.15-1.25	60-100	4.8-7.0
Діазим SSF	Danisco®	1.12-1.15	30-65	3.0-5.5
Cellic C Tec2	Novozymes	1.13-1.15	45-50	5.0-5.5
Протеаза C	Enzyme Biotech	1.12-1.15	30-70	5.0-11.0

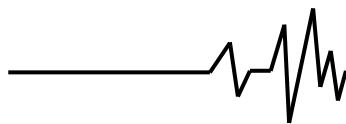
Схема ферментативного гідролізу

Варіант 1 – 76.85 г помелу кукурудзяних відходів + 200 мл води - підкислення 25% сірчаною кислотою до pH 5.0-5.2 + *Cellic CTec2* - витримка 1 годину за температури 48-50 °C + □-амілаза в кількості 2 од/г крохмалю - 3 години розрідження при 90°C або 75 °C.

Варіант 2 - 76,85 г помелу кукурудзяних відходів + 200 мл води - підкислення 25% сірчаною кислотою до pH 5.0-5.2 + □-амілаза в кількості 2 од/г крохмалю - 3 години розрідження при 75°C – охолодження до 50 °C + *Cellic CTec2* - витримка 1 годину.

В роботі використовували загальноприйняті в спиртовій промисловості методи досліджень [20]. Вміст спирту в бражних дистилятах визначали ареометрично [21], незброджених вуглеводів – колориметрично з антроновим реактивом [22].

Умовну крохмалистість зернових відходів, технологічні режими бродіння визначали методом бродильної проби. Помел кукурудзяних



відходів змішували з водою в конічній колбі об'ємом 500 см³, доводили об'єм суміші до 250 см³ та проводили розрідження відповідно до обраних в експериментах технологічних режимів. Розріджену масу охолоджували до температури 30°C, вносили оцукрюючий ферментний препарат «Діазим ССФ» фірми «Даніско» із розрахунку 8 од/г крохмалю, 0,01 см³ протеолітичного ферментного препарату Протеаза С, антисептик Бактрилон та 10 см³ дріжджової суспензії. Після цього колби закривали кислотним затвором та проводили зброджування за температури 30 °C впродовж 72-80 годин. Для приготування дріжджової суспензії для кожної колби наважку 1 г сухих дріжджів розводили у 10 см³ води, витримували 20-25 хвилин і вносили в колбу з суслом.

Динаміку гідролізу крохмалю та целюлози за кількістю утворених цукрів визначали методом високоефективної рідинної хроматографії на хроматографі Shimadzu Lab Solutions.

Основні результати досліджень. В залежності від композиційного складу ферментних препаратів та технологічних параметрів процес зброджування може здійснюватися з різною кількістю утворення етилового спирту і незброджених цукрів. Для встановлення дозування ферментних препаратів необхідно чітко визначити умовну крохмалистість зернових відходів.

1. Визначення умовної крохмалистості кукурудзяних відходів

Порядиметричний метод визначення умовної крохмалистості для зернових відходів може давати значну похибку через неможливість встановлення точного значення коефіцієнта Еверса. Тому ми встановлювали крохмалистість відходів кукурудзи за методом бродильної проби. Для цього відходи подрібнювали до борошна, брали наважку 50 г, додавали води до об'єму 250 см³, ферментний препарат α -амілазу в кількості 2 од/г крохмалю і проводили розрідження на водяній бані 3 години за температури 90°C. Потім здійснювали оцукрення і бродіння протягом 72 годин в термостаті за температури 30°C. Результати визначення наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Визначення умовної крохмалистості кукурудзяних відходів

Показник	Вміст
Кількість CO ₂ на 72 години, г/250 см ³	16.04
Вміст спирту, % об.	7.8
Вміст загальних вуглеводів, г/100 см ³	0.242
Умовна крохмалистість, %	58.68

Таким чином, умовна крохмалистість зернових відходів становить 58.7%, в той час як поляриметричним методом було визначено крохмалистість 63% (таблиця 1). Тому в подальших дослідженнях наважка проби розраховувалась із значення крохмалистості за бродильною пробю.

Відомо, що розрідження крохмалю термостабільною α -амілазою здійснюється в діапазоні температур від 60 до 100°C. Але за високими температурами 90-100 °C відбувається значна втрата активності розріджувачого ферменту майже на 85% [8]. Крім того на нагрівання затору до високих температур витрачається велика кількість енергії, що впливає на собівартість готового продукту. Для визначення впливу температури розрідження на кількість утворених цукрів нами проводилось розрідження сусла ферментним препаратом Амілекс 4Т в кількості 2,0 од/г крохмалю за температури 90 і 75 °C протягом 3 годин.

Оскільки у відходах кукурудзи міститься до 45 % лушпиння та залишків соломи, що складаються з целюлози, нами було досліджено вплив целюлолітичних ферментних препаратів на утворення зброджуваних цукрів в кукурудзяному суслі під час гідролізу. Оскільки оптимум дії целюлолітичних ферментів відповідає значенню рН 5-5.5, сусло підкислювали 25% сірчаною кислотою до рН 5-5.2 і здійснювали ферментативний гідроліз за Варіантом 1. Як контроль використовували сусло, виготовлене з кукурудзяних відходів і води після розрідження за температури 90 і 75 °C без додавання целюлолітичних ферментів. Для оцінки динаміки утворення цукрів під час ферментативного гідролізу целюлолітичними і амілолітичними ферментними препаратами визначали вуглеводний склад зразків до і після гідролізу на рідинному хроматографі (рис.2).

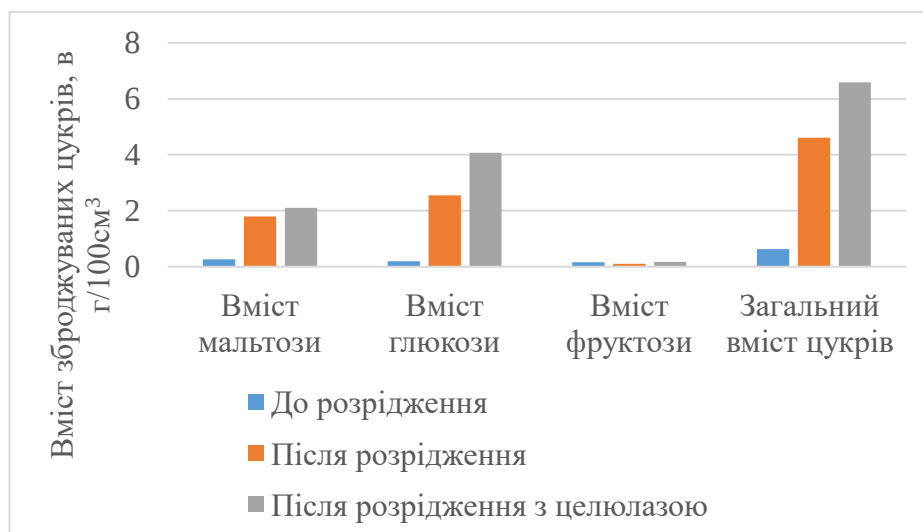
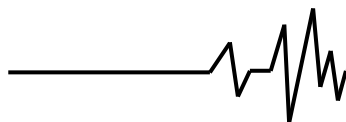


Рис.1 Вуглеводний склад кукурудзяного сусла після гідролізу амілолітичним і целюлолітичним ферментними препаратами

Одержані результати показали, що гідроліз целюлазою збільшив кількість утворених зброджуваних цукрів в 1,5 рази в основному за рахунок глюкози, тобто під дією ферменту відбулося розщеплення целюлозовмісних компонентів сусла в глюкозу. Очевидно, що за рахунок збільшення кількості зброджуваних дріжджами вуглеводів підвищиться кількість утвореного етилового спирту.

Для визначення впливу температурного режиму розрідження крохмалю на вихід етилового спирту та показники бражки, сусло підкислювали 25% сірчаною кислотою до pH 5-5.2, додавали фермент целюлазу *Cellic CTec2* в кількості 1 г, витримували 1 годину за

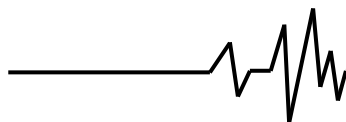
температури 52 °C, далі додавали альфа-амілазу і здійснювали розрідження за температури 90 °C і 75°C протягом 3 годин, охолоджували до 30 °C і проводили одночасне оцукрення і бродіння за режимом SSCF протягом 80 годин.

Як контроль використовували сусло з кукурудзяних відходів, розрідження якого відбувалось за температури 90 °C і 75 °C без підкислення і додавання целюлази. В обох випадках в сусло за температури 50°C вносили протеолітичний фермент Протеазу С в кількості 1 см³ для розщеплення білкових сполук, що містились в кукурудзяних відходах. Хімічний склад зрілої бражки наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

Показники зрілої бражки, одержаної за різними режимами розрідження із застосуванням целюлолітичного ферментного препарату.

Показник	Температурні режими розрідження сусла			
	t – 87-90 °C, 3 години		t – 73-75 °C, 3 години	
	Без додавання целюлази	З додаванням целюлази	Без додавання целюлази	З додаванням целюлази
pH сусла перед бродінням	5.89	5.2	5.9	5.1
Вміст CO ₂ , г/250 см³:				
- на 24 годину;	15.03	16.07	15.42	17.89
- на 48 годину;	21.30	21.85	23.19	23.26
- на 72 годину;	22.93	23.17	23.58	23.52
- на 80 годину	23.21	23.51	23.92	23.66
Дійсні сухі речовини, %	3.6	3.5	3.7	3.5
Незброджені вуглеводи, г/100 см³:				
- Загальні	0.54	0.49	0.74	0.59
- Водорозчинні	0.50	0.48	0.59	0.49
- Нерозчинений крохмаль	0.04	0	0.14	0.09
- Спирторозчинні	0.21	0.18	0.25	0.20
- Декстрини	0.26	0.28	0.27	0.06
Вміст спирту, % об.	11.35	11.50	11.50	11.75



Одержані результати показують, що при розрідженні сусла за температурою 90 °С без попереднього внесення целюлази утворилось 11.35 % об. спирту, нерозчиненого крохмалю було в межах похибки визначення, вміст незброджених вуглеводів також був в межах норми. Зниження температури розрідження на 15°С дещо погіршило показники розчинення, в контрольній бражці залишилось 0,14 г/100 см³ нерозчиненого крохмалю, що в 3 рази більше ніж за розрідженням при 90 °С, загальних вуглеводів також було в 1.4 рази більше, що свідчить про незавершений процес розрідження сусла. Але спирту утворилось на 0.15 % об. більше, що на нашу думку пояснюється збереженням активності розріджувачого ферменту за температури 75°С і утворенням більшої кількості зброджуваних цукрів в початковому суслі. Одержані результати корелюються з даними, що наведені в роботі [8]. Автори показали, що режим розрідження кукурудзяного сусла за температури 50-70 °С впродовж однієї години та підвищення до 90 °С і витримки дві години забезпечив утворення етилового спирту на 0,2 % об. більше, ніж за розрідженням за температури 90 °С, що пояснюється більшим утворенням цукрів за рахунок збереження активності ферменту [8].

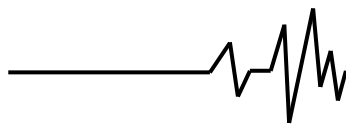
Додавання в сусло целюлолітичного ферментного препарату *Cellic CTec2* підвищило вміст спирту в зрілій бражці на 0,15 %об. в порівнянні з контролем за рахунок утворення глюкози під час ферментативного гідролізу целюлози. Зниження температури розрідження

сусла з 90 до 75 °С не погіршило хімічний склад бражки, вміст загальних, водорозчинних, спирторозчинних вуглеводів відповідав контрольному досліді при розрідженні сусла за температури 90°С, а вміст етилового спирту був на 0.4 %об. більшим.

Збільшення виходу етилового спирту за умов додавання целюлолітичних ферментних препаратів пояснюється не тільки ферментативним гідролізом целюлози до зброджуваних цукрів. Відомо, що при переробці целюлозовмісної сировини необхідна попередня обробка (делігніфікація), що проводиться з метою руйнації хімічних зв'язків між молекулами целюлози, геміцелюлози і лігніну для вивільнення целюлози і подальшого її ферментативного гідролізу до зброджуваних цукрів. Найбільш розповсюдженим методом попередньої обробки сільськогосподарських відходів до цього часу є різні варіанти кислотного або лужного гідролізу. На нашу думку, під час розрідження сусла відбувається часткова делігніфікація целюлозовмісних компонентів сировини під дією сірчаної кислоти і температури. Для підтвердження такого висновку ми проводили ферментативний гідроліз сусла, підкисленого 25 % сірчаною кислотою до рН 5.1, за Варіантом 1 і Варіантом 2 з хроматографічним визначенням кількості утворених цукрів на кожній стадії гідролізу. Результати наведено на рис.3.



Рис.2 Динаміка утворення вуглеводів в результаті ферментативного гідролізу підкисленого кукурудзяного сусла



Як видно з наведених даних, загальний вміст цукрів після ферментативного гідролізу сусла за варіантом 2 збільшився в 1,2 рази в порівнянні з варіантом 1, в основному за рахунок утворення глюкози, що є продуктом розщеплення целюлози під дією целюлолітичних ферментів. Вміст інших цукрів за обома варіантами гідролізу майже не змінився. Це підтверджує наш висновок, що під час розрідження підкисленого сірчаною кислотою сусла за температури 75 °С відбувається зміна структури хімічних зв'язків між молекулами целюлози, геміцелюлози і лігніну за рахунок проходження часткового кислотного гідролізу. В результаті відбувається зміна будови целюлози та вивільнення лігніну, що в свою чергу покращує ферментативний гідроліз до глюкози. Подальше зброджування такого сусла збільшує вихід етилового спирту.

В таблиці 5 наведено показники зрілої бражки, одержаної в результаті зброджування сусла, що було розріджено:

- за варіантом 1 – додавання целюлолітичного ферменту перед гідролізом амілолітичними ферментами;

- за варіантом 2 – розрідження амілолітичними ферментами підкисленого сусла з подальшим гідролізом целюлолітичними

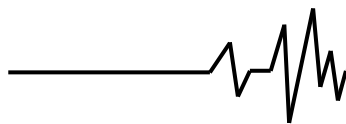
Вплив режимів розрідження кукурудзяного сусла на показники бражки

Показник	Зброджування сусла за варіантом 1	Зброджування сусла за варіантом 2
pH сусла перед зброджуванням	5.2	5.0
Вміст незброджених вуглеводів, г/100 см ³ :		
- дисахариди	0,247	0,168
- глюкоза	0,042	0,037
- фруктоза	0,02	0,024
- загальна кількість цукрів	0,309	0,229
- Декстрини	0,07	0,05
Вміст спирту, % об.	11,75	11,85

З наведених даних видно, що вміст спирту при проведенні ферментативного гідролізу за 2 варіантом був вищим в порівнянні з 1 варіантом на 0,1%, вміст декстринів і незброджених вуглеводів за 2 варіантом гідролізу був в 1,35 рази нижчим. Це свідчить про більш інтенсивне дооцукрювання декстринів глюкоамілазою під час бродіння. Очевидно, що режим розрідження за 2 варіантом сприяє утворенню більшої кількості зброджуваних цукрів в результаті гідролізу крохмалю і целюлози, а також збереженню ферментів на весь період бродіння.

Висновки. Повнота використання крохмалю і целюлози, введених в технологічний процес залежить від збереження активності ферментів за рахунок різних параметрів – підготовки сировини до гідролізу, температурного режиму. При зброджуванні кукурудзяних відходів, що містили окрім крохмалю також целюлозовмісну складову, рекомендовано спочатку підкислювати сусло до pH 5.0-5.2 сірчаною кислотою. Потім проводити гідроліз сусла амілолітичними ферментами за температури 75 °С. Одночасно при розрідженні

відбувалась часткова делігніфікація целюлозовмісної складової кукурудзяних відходів за рахунок кислотного гідролізу, що сприяло вивільненню целюлози. Гідроліз целюлолітичними ферментними препаратами проводили за температури 50 °С після розрідження амілазами. Оцукрення і зброджування сусла здійснювали за режимом SSCF. Це сприяло економії енергоресурсів за рахунок зниження температури розрідження, зменшенню кількості доданих ферментних препаратів за рахунок збереження їх активності, більш повному використанню целюлозовмісної складової сировини, підвищенню кількості утворених в результаті гідролізу зброджуваних цукрів. Вихід етилового спирту при зброджуванні кукурудзяних відходів за такими режимами становив 68 дал/т сировини, що на 2.9 дал/т більше ніж за класичними умовами розрідження за температури 90 °С без гідролізу целюлози.



Список використаних джерел

1. Ethanol Market Size, Share and Trends 2025 to 2034. Precedence Research.- Режим доступу:

<https://www.precedenceresearch.com/ethanol-market> (Дата звернення - 12.05.2025)

2. Azimbayeva G.E., Kamysbayeva A. K., Sagimbayeva A. E., Yessenova M. D., Bakibaev A. A. Production of ethyl alcohol from plants of the Asteraceae family. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023. Vol. 13, P. 9775–9781. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02840-3>

3. Класифікація відходів зерна. Аудит обліку – Режим доступу: <https://elevator.com.ua/blog/klasifikatsiya-vidkhodiv-zerna-audit-obliku> (Дата звернення - 31.10.2025)

4. Gawande S.B., Patil I.D. Experimental Investigation and Optimization for Production of Bioethanol from Damaged Corn Grains. *Materialstoday: proceedings*. 2018. Vol. 5, Issue 1, Part 1, P. 1509-1517. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.240>

5. Hua Xiao, Yang Ruijin. Enzymes in starch processing. *Enzymes in Food and Beverage Proctssing*. 2015. C. 139 – 170. <https://doi.org/10.1201/b19408>

6. Шиян П. Л., Сосницький В. В., Олійничук С. Т. Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика: монографія. Київ: ВД «Асканія», 2009. 424 с.

7. Bednarska K.A. Kinetic modelling of enzymatic starch hydrolysis. 2015. Wageningen University. Wageningen. <https://edepot.wur.nl/343988>

8. Oliynichuk S.T., Danilova K.O. Dextrinization of starch with alpha-amylase in the conditions of ethyl alcohol production. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2023. Vol. 31. No. 3. P.627-634. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i3.280974>

9. Saroj P., Manasa P. and Narasimhulu K. Biochemical Characterization of Thermostable Carboxymethyl Cellulase and β -Glucosidase from *Aspergillus fumigatus*. *Applied biochemistry and biotechnology*. 2025. 194 (6). P. 2503-2527. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12010-022-03839-2>.

10. Ковальчук С., Мудрак Т.О. Інноваційна технологія зброджування висококонцентрованого сусла із зернової сировини. *Prospects and priorities of research in science and technology*, 2020, С. 60-100 <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-008-7.1-4>

11. Vidmantiene D., Juodeikiene G., Basinskiene L. Technical ethanol production from waste of cereals and its products using a complex enzyme preparation. *Journal of the science of food and agriculture*. 2006. Vol. 86(11). P. 1732-1736. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2514>.

12. Smuga-Kogut M. The Utilization of the Corn Stover in Production of the Second Generation

Biofuel. *Rocznik ochrona srodowiska*. 2016. V.18, Part 1, P.507-518

13. Zhi-Hua Liu, Lei Qin, Jia-Qing Zhu, Bing-Zhi Li, Ying-Jin Yuan. Simultaneous saccharification and fermentation of steam-exploded corn stover at high glucan loading and high temperature. *Biotechnology for Biofuels*. 2025. Vol. 7 (1): 167. <https://doi.org/10.1186/s13068-014-0167-x>

14. Olofsson K., Bertilsson M., Lidén G. A short review on SSF – an interesting process option for ethanol production from lignocellulosic feedstocks. *Biotechnology for Biofuels*. 2008. Vol. 1, Article number 7. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-1-7>

15. Azmi A. S., Malek M. I. A., Puad N. I. M. A review on acid and enzymatic hydrolyses of sago starch. *International Food Research Journal*, 2017. 24. P. 265–273. <http://www.ifrj.upm.edu.my>

16. Al-Amri A. A., Al-Ghamdi M. A.a., Khan J. A.a., Altayeb H. N.a., Alsulami H.A., Sajjad M. B., Baothman O. A. A., Nadeem M. S. Escherichia coli expression and characterization of α -amylase from *geobacillus thermodenitrificans* dsm-465. *Brazilian Journal of Biology*. 2022. 82. <https://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.239449>

17. Margetić A., Dojnov B., Vujčić M., Mišić M., Božić N., Vujčić Z. Modified simultaneous saccharification and fermentation for the production of bioethanol from highly concentrated raw corn starch. *Fuel*. 2023. Vol. 338. <https://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127363>

18. Cripwell R.A., Favaro L., Viljoen-Bloom M., Van Zyl W. H. Consolidated bioprocessing of raw starch to ethanol by *Saccharomyces cerevisiae*: Achievements and challenges. *Biotechnology Advances*, 2020. 42. <https://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107579>

19. Ферментні препарати. – Режим доступу: <https://tristan.org.ua/ru/produksiya/fermentnye-preparaty> (Дата звернення - 02.11.2025)

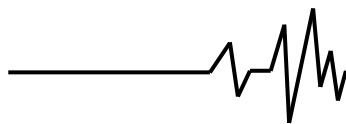
20. Великая О. И., Суходол В. Ф. Лабораторный практикум по курсу общей технологии броидильных производств. М.: «Легкая и пищевая промышленность», 1983. 307 с.

21. СОУ 15.9-37-242:2005 Сировина крохмалевмісна зброджена для виробництва етилового спирту. Методи визначання об'ємної частки етилового спирту. Міністерство аграрної політики України. Київ, 2006. 23 с.

22. СОУ 15.9-37-243:2005 Сировина крохмалевмісна зброджена для виробництва етилового спирту. Методи визначання незброджених вуглеводів. Міністерство аграрної політики України. Київ, 2006. 37 с.

References

1. Ethanol Market Size, Share and Trends 2025 to 2034. Precedence Research.



<https://www.precedenceresearch.com/ethanol-market> (12.05.2025)

2. Azimbayeva G.E., Kamysbayeva A. K., Sagimbayeva A. E., Yessenova M. D., Bakibaev A. A. (2023) Production of ethyl alcohol from plants of the Asteraceae family. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 9775–9781. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02840-3>

3. *Klasyfikatsiya vidhodiv zerna. Audyt obliku* [Classification of grain waste. Accounting audit]. <https://elevator.com.ua/blog/klasyfikatsiya-vidkhodiv-zerna-audyt-obliku> (31.10.2025)

4. Gawande S.B., Patil I.D. (2018) Experimental Investigation and Optimization for Production of Bioethanol from Damaged Corn Grains. *Materialstoday: proceedings*, 5(1), Part 1, 1509–1517. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.240>

5. Hua Xiao, Yang Ruijin. (2015) Enzymes in starch processing. *Enzymes in Food and Beverage Processing*. 139 – 170. <https://doi.org/10.1201/b19408>

6. Shyyan P.L., Sosnytskyi V.V., Oliynichuk S.T. (2009) *Innovatsiyni technologii spyrtovoi promyslovosti. Yeriya I praktika: monografiya* [Innovative technologies of the alcohol industry. Theory and practice: monograph]. Kyiv: Vd «Askaniya», 424 c.

7. Bednarska K.A. (2015) Kinetic modelling of enzymatic starch hydrolysis. Wageningen University. Wageningen. <https://edepot.wur.nl/343988>

8. Oliynichuk S.T., Danilova K.O. (2023) Dextrinization of starch with alpha-amylase in the conditions of ethyl alcohol production. *Journal of Chemistry and Technologies*, 31(3), 627–634. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i3.280974>

9. Saroj P., Manasa P. and Narasimhulu K. (2025) Biochemical Characterization of Thermostable Carboxymethyl Cellulase and β -Glucosidase from *Aspergillus fumigatus*. *Applied biochemistry and biotechnology*, 194 (6), 2503–2527. <https://doi.org/10.1007/s12010-022-03839-2>

10. Kovalchuk S., Mudrak T.O. (2020) *Innovatsiyna tehnologiya zbrodghuvannya vysokokontsentrovanogo susla iz zernovoi syrovyny* [Innovative technology for fermenting highly concentrated mash from grain raw materials]. Prospects and priorities of research in science and technology, 60–100. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-008-7.1-4>

11. Vidmantiene D., Juodeikiene G., Basinskiene L. (2006) Technical ethanol production from waste of cereals and its products using a complex enzyme preparation. *Journal of the science of food and agriculture*, 86(11), 1732–1736. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2514>

12. Smuga-Kogut M. (2016) The Utilization of the Corn Stover in Production of the

Second Generation Biofuel. *Rocznik ochrona srodowiska*, 18 (1), 507–518.

13. Zhi-Hua Liu, Lei Qin, Jia-Qing Zhu, Bing-Zhi Li, Ying-Jin Yuan (2025) Simultaneous saccharification and fermentation of steam-exploded corn stover at high glucan loading and high temperature. *Biotechnology for Biofuels*, 7 (1), 167. <https://doi.org/10.1186/s13068-014-0167-x>

14. Olofsson K., Bertilsson M., Lidén G. A. (2008) Short review on SSF – an interesting process option for ethanol production from lignocellulosic feedstocks. *Biotechnology for Biofuels*, 1, № 7. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-1-7>

15. Azmi A.S., Malek M.I.A., Puad N.I.M. (2017) A review on acid and enzymatic hydrolyses of sago starch. *International Food Research Journal*, 24, 265–273. <http://www.ifrj.upm.edu.my>

16. Al-Amri A. A., Al-Ghamdi M. A.a., Khan J. A.a., Altayeb H. N.a., Alsulami H.A., Sajjad M. B., Baothman O. A. A., Nadeem M. S. (2022) *Escherichia coli* expression and characterization of α -amylase from *Geobacillus thermodenitrificans* dsm-465. *Brazilian Journal of Biology*, 82. <https://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.239449>

17. Margetić A., Dojnov B., Vujčić M., Mišić M., Božić N., Vujčić Z. (2023) Modified simultaneous saccharification and fermentation for the production of bioethanol from highly concentrated raw corn starch. *Fuel*, 338. <https://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127363>

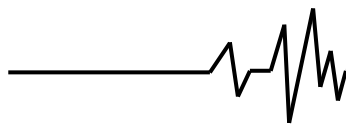
18. Cripwell R.A., Favaro L., Viljoen-Bloom M., Van Zyl W. H. (2020) Consolidated bioprocessing of raw starch to ethanol by *Saccharomyces cerevisiae*: Achievements and challenges. *Biotechnology Advances*, 2020, 42. <https://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107579>

19. *Fermentni preparaty* [Enzyme preparations] <https://tristan.org.ua/ru/produksiya/fermentnye-preparaty> (02.11.2025)

20. Velikaya O.I., Suhodol V.F. (1983) *Laboratnyi praktikum po kursu obchei tehnologii brodilnykh proizvodstv* [Laboratory practical training on the course on general technology of fermentation production] M.: «Legkaya i pischevaya promyshlennost», 307 p.

21. SOU 15.9-37-242:2005 *Syrovyna krohmalevmisna zbrodgena dlya vyrobnytstva etylovogo spyrtu. Metody vyznachennya ob'emnoi chastky etylovogo spyrtu* [Starch-containing raw materials fermented for the production of ethyl alcohol. Methods for determining the volume fraction of ethyl alcohol]. Ministerstvo agrarnoi polityky Ukrainy, Kyiv, 2006, 23 p.

22. SOU 15.9-37-243:2005 *Syrovyna krohmalevmisna zbrodgena dlya vyrobnytstva etylovogo spyrtu. Metody vyznachennya nezbrodgenykh vuglevodiv*. [Starch-containing raw



materials fermented for the production of ethyl alcohol. Methods for determining the unfermented carbohydrates] Ministerstvo agrarnoi polityky Ukrainy, Kyiv, 2006, 37 p.

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF USING NON-FOOD RAW MATERIALS FROM FLOUR MILLING FOR BIOCONVERSION IN ETHANOL

The decisive factor in the efficiency of ethyl alcohol production from starch-containing raw materials is the depth and completeness of starch and structural carbohydrate hydrolysis into monosugars using enzyme preparations of microbial origin. The degree of utilization of starch and cellulose introduced into the technological process largely depends on the preservation of enzymatic activity, which is determined by the parameters of raw material preparation for hydrolysis, the acidity of the medium, and the applied temperature regimes.

Prior to enzymatic hydrolysis, the mash was acidified to pH 5.0–5.2 with sulfuric acid, followed by liquefaction using amylolytic enzymes at a temperature of 75 °C. During the liquefaction stage, partial delignification of the cellulose-containing fraction of corn processing residues

occurred as a result of acid hydrolysis, which promoted cellulose release and increased its availability for subsequent enzymatic conversion. Cellulose hydrolysis using cellulolytic enzyme preparations was carried out after the liquefaction stage at a temperature of 50 °C.

Saccharification and fermentation of the mash were performed under the SSCF regime, which ensured a reduction in energy consumption due to lower liquefaction temperature, decreased enzyme dosage as a result of preserved enzymatic activity, and more complete utilization of the cellulose-containing fraction of the raw material. As a result, the concentration of fermentable sugars and the efficiency of alcoholic fermentation increased. The yield of ethyl alcohol obtained from the fermentation of corn residues under the proposed conditions reached 68 dal/t of raw material, which is 2.9 dal/t higher than that achieved under conventional liquefaction conditions at 90 °C without the use of cellulase.

The obtained results can be applied in the development of energy-efficient technologies for processing starch-containing raw materials in the alcohol industry.

Keywords: corn waste, ethyl alcohol, hydrolysis, amylolytic and cellulolytic enzymes, fermentation.

Відомості про авторів

Данілова Катерина Олегівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, учений секретар Інституту продовольчих ресурсів Національної академії аграрних наук України (вул. Євгена Сверстюка, 4а, м. Київ, 02002, Україна, e-mail: dankoek77@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0001-6204-9975>).

Левандовський Леонід Вікторович – доктор технічних наук, професор, професор Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, e-mail: levandov7@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0001-5813-0447>).

Соломон Алла Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри біоінженерії біо- та харчових технологій Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, e-mail: soloalla78@ukr.net).

Danilova Kateryna – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Scientific Secretary, Institute of Food Resources of National Academy Agrarian Science of Ukraine (4a, Evgena Sverstuka St., Kyiv, Ukraine, 02002, e-mail: dankoek77@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0001-6204-9975>).

Levandovskiy Leonid – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Bioengineering, Bio- and Food Technologies Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonyacna Str., Vinnytsia, Ukraine, e-mail: levandov7@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0001-5813-0447>).

Solomon Alla - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Bioengineering, Bio- and Food Technologies Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonyacna Str., Vinnytsia, Ukraine), e-mail: soloalla78@ukr.net.

Стаття надійшла 03.11.2025

Стаття прийнята 16.11.2025

Опубліковано 25.12.2025.