

УДК 663.52

ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ БОРОШНОМЕЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЕТИЛОВОГО СПИРТУ

Данілова К. О., к.т.н., с.н.с., учена секретарка
<https://orcid.org/0000-0001-6204-9975>

Олійнічук С. Т., д.т.н., с.н.с., завідувач відділу технології продуктів бродіння
<https://orcid.org/0000-0002-2885-6754>

Коваль О. О., к.т.н. с.н.с. відділу технології продуктів бродіння
<https://orcid.org/0000-0003-1035-5895>

Заварзіна О. С., пров. фахівчиня відділу технології продуктів бродіння
<https://orcid.org/0000-0003-3241-8463>

Інститут продовольчих ресурсів НААН, Київ, Україна

<https://doi.org/10.31073/foodresources2025-24-17>

Предмет. Виробництво етилового спирту з зернових відходів борошномельних підприємств. На європейському ринку зростає попит саме на біоетанол другого покоління, який виготовляється з неїстівної сировини – наприклад, соломи або відходів деревини. Натомість в Україні наразі переважно виробляється біоетанол першої генерації з продовольчої сировини. Більшість сільськогосподарських відходів містять понад 50% зброджуваних цукрів, полісахарид целюлозу (23–50%), геміцелюлозу (12–29%) та ароматичний полімер лігнін (13–31%). **Мета.** Визначити вплив процесу делігніфікації і ферментативного гідролізу некрохмальних полісахаридів зернових відходів на вихід етилового спирту. **Методи.** В роботі використовували загальноприйняті в спиртовій промисловості методи досліджень. Для визначення умовної крохмалистості зернових відходів використовували поляриметричний метод, вміст крохмалю біологічним методом визначали бродильною пробою. Вміст лігніну – прямим методом шляхом гідролізу сумішшю концентрованої соляної кислоти та 72% сірчаної кислоти. Кількість полісахаридів, що легко та важко гідролізуються, визначали за методом Макена-Шорля. Вміст спирту у зброджених дистилатах визначали ареометрично, масову концентрацію незброджених вуглеводів – колориметрично з антроновим реактивом. **Результати.** Серед дослідженої нами сировини найбільший вміст крохмалю мали зернові відходи гречки до 50%, в іншій сировині був приблизно однаковий вміст крохмалю (24–28%). Відходи кукурудзи і пшеничні висівки містили найбільшу кількість некрохмальних полісахаридів, зокрема целюлозу, які можна гідролізувати до зброджуваних цукрів. Гідроліз целюлолітичними ферментами ефективний для сировини, що має високий вміст некрохмальних полісахаридів, а саме висівок пшеничних і відходів кукурудзи, вихід спирту при цьому збільшується на 3,1–4 дал з 1 т сировини. Органосольвентна делігніфікація руйнує лігнінові зв'язки і робить біомасу більш доступною до дії ферментів, про що свідчить збільшення виходу спирту з 1 т сировини на 4,3 дал. **Сфера застосування результатів.** Результати досліджень будуть використані для розробки ефективної схеми виробництва спирту етилового з зернових відходів борошномельних підприємств.

Ключові слова: зернові відходи, етиловий спирт, крохмаль, лігнін, ферментативний гідроліз, органосольвентна делігніфікація, збродження

USE OF FLOUR MILLING WASTE FOR ETHYL ALCOHOL PRODUCTION

Kateryna Danilova, PhD, Engineering, Senior Researcher, Scientific Secretary
<https://orcid.org/0000-0001-6204-9975>

Serhiy Oliynichuk, D-r of Sc., Engineering, Senior Researcher,
Head of Fermentation Products Technology Department
<https://orcid.org/0000-0002-2885-6754>

Olga Koval, PhD, Engineering,
Senior Researcher of Fermentation Products Technology Department
<https://orcid.org/0000-0003-1035-5895>

Oksana Zavarzina, Senior Specialist of Fermentation Products Technology Department
<https://orcid.org/0000-0003-3241-8463>
Institute of Food Resources of NAAS, Kyiv, Ukraine

Subject. Production of ethyl alcohol from grain waste of flour milling enterprises. In the European market, demand is growing for second-generation bioethanol, which is made from inedible raw materials – for example, straw or wood waste. In contrast, in Ukraine, first-generation bioethanol is currently mainly produced from food raw materials. Most agricultural waste contains more than 50% fermentable sugars, the polysaccharide cellulose (23–50%), hemicellulose (12–29%) and the aromatic

polymer lignin (13–31%). **Purpose.** To determine the effect of the delignification process and enzymatic hydrolysis of non-starch polysaccharides of grain waste on the yield of ethyl alcohol. **Methods.** The work used research methods generally accepted in the alcohol industry. To determine the conditional starchiness of grain waste, a polarimetric method was used, the starch content was determined by a biological method using a fermentation sample. Lignin content – by direct method by hydrolysis with a mixture of concentrated hydrochloric acid and 72% sulfuric acid. The amount of polysaccharides that are easily and difficultly hydrolyzed was determined by the Maken-Schorl method. The alcohol content in fermented distillates was determined areometrically, the mass concentration of unfermented carbohydrates – colorimetrically with anthrone reagent. **Results.** Among the raw materials we studied, buckwheat grain waste had the highest starch content up to 50%, other raw materials had approximately the same starch content (24–28%). Corn waste and wheat bran contained the largest amount of non-starch polysaccharides, in particular cellulose, which can be hydrolyzed to fermentable sugars. Hydrolysis with cellulolytic enzymes is effective for raw materials with a high content of non-starch polysaccharides, namely wheat bran and corn waste, the alcohol yield increases by 3.1–4 dal from 1 t of raw materials. Organosolvent delignification destroys lignin bonds and makes biomass more accessible to the action of enzymes, as evidenced by an increase in the yield of alcohol from 1 t of raw materials by 4.3 dal. **Scope of results.** The results of the research will be used to develop an effective scheme for the production of ethyl alcohol from grain waste of flour milling enterprises.

Key words: grain waste, ethyl alcohol, starch, lignin, enzymatic hydrolysis, organosolvent delignification, fermentation

Постановка проблеми. Обсяг світового ринку етанолу в минулому році становив понад 109 мільярдів 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].

США та Бразилія є двома провідними країнами з виробництва біоетанолу з зерна кукурудзи та цукрової тростини. В 2024 році понад 100 мільярдів літрів біоетанолу було вироблено зброджуванням вуглеводів з цукро- і крохмалевмісної сировини дріжджами. З цього обсягу приблизно 28% паливного етанолу було виготовлено з бразильського тростинного цукру і приблизно 53% – з глюкози, одержаної з крохмалю кукурудзи, в основному в США [2]. Однак виробництво біопалива з крохмалю та цукру суттєво порушує світову продовольчу безпеку людства, відбираючи частку від продовольчого ринку. Значне збільшення виробництва етанолу, зменшення його собівартості та підвищення конкурентної спроможності світова спільнота пов'язує з використанням нехарчової сировини або сільськогосподарських відходів. За даними останніх досліджень, світове виробництво лігніноцелюлозної біомаси складає не менше 245 млн тон в рік, що надає можливість виробляти з неї $4,3 \times 10^{18}$ Дж енергії та може замінити майже 7% від загального виробництва енергії [3]. Потенціал післязбиральних відходів кукурудзи у всьому світі складає приблизно 120 млн тон і тільки в США з них може бути вироблено до 50 млрд тон біоетанолу [4]. Серед найбільших виробників біопалива є США (понад 5,5 триліонів дал), Бразилія (понад 3 триліонів дал). ЄС виробляє до 0,8 триліонів дал біоетанолу, частка інших країн світу складає не більше 0,5 триліонів дал.

Більшість сільськогосподарських відходів містять понад 50% зброджуваних цукрів, полісахарид целюлозу (23–50%), геміцелюлозу (12–29%) та ароматичний полімер лігнін (13–31%) [4]. Високий вміст в них лігніну, який завдяки своїй будові «зшиває» молекули целюлози і геміцелюлози, робить їх непридатними для подальшого гідролізу і ферментації. Саме тому необхідна попередня обробка лігніноцелюлозної сировини для руйнації лігнінових зв'язків і вивільнення целюлози для ферментативного гідролізу до цукрів, що зброджуються дріжджами в етанол. В обзорі (5) зазначено, що попередня обробка біомаси фізичними, хімічними і біологічними методами необхідна для розчинення структури лігніноцелюлозної біомаси, а їх комбінація призводить до більш ефективної руйнації та робить біомасу доступною для подальшого ферментативного гідролізу і бродіння. Перспективними і екологічно чистими напрямками вважаються методи парового вибуху та біологічної обробки мікроорганізмами та ферментами (6, 7).

Ефективність попередньої обробки сільськогосподарських відходів визначається такими умовами:

- зменшення розміру біомаси;
- максимальне видалення лігніну;
- мінімальні втрати зброджуваних цукрів;
- зменшення утворення інгібіторів процесів гідролізу і бродіння;
- невисока вартість попередньої обробки сировини;
- нетоксичність реагентів, що застосовуються при обробці.

Дотримання таких умов робить процес економічно ефективним. Цим вимогам відповідає органосольвентна обробка сировини за допомогою органічних розчинників для делігніфікації, таких як етанол, гліцерин, ацетон, метанол тощо, що додаються до біомаси в присутності каталізаторів за визначеної температури і тиску. Каталізаторами можуть бути сірчана кислота, гідроксид натрію або сульфат магнію [8, 9, 10, 11].

Для зменшення негативного впливу на довкілля, на нашу думку, перспективним буде використання етилового спирту як органічного розчиннику для органосольвентної делігніфікації, оскільки він є кінцевим продуктом переробки сировини. Як каталізатор нами використовувалась сірчана кислота. Враховуючи особливості етанольного виробництва, вивчення впливу технологічних процесів органосольвентної обробки та ферментативного гідролізу зернових відходів на вихід етилового спирту є актуальним.

Сучасна класична технологія, яка базується на гідролізі лігніноцелюлозної сировини розведеною кислотою, має приблизно 35% ефективності від біомаси до етанолу. Удосконалення попередньої обробки та прогрес у біотехнології, особливо завдяки комбінаціям процесів, можуть підвищити ефективність виробництва етанолу до 48%, а загальну ефективність процесу – до 68%. [12]. Поточні витрати на виробництво етанолу мають широкий діапазон. Сировина для виробництва біопалива значною мірою впливає на економічну ефективність процесу. Витрати на виробництво біопалива, виробленого з крохмалевмісної сировини (біопаливо першого покоління), значно нижчі порівняно з біопаливом, виробленим з лігніноцелюлозної біомаси та відходів (біопаливо другого покоління).

Наразі США є основним постачальником біоетанолу до Європи – понад 300 тис. т на рік. Проте в разі початку митної війни імпорту американського біоетанолу може суттєво скоротитися або припинитися. У такій ситуації Україна може стати одним із ключових постачальників, компенсуючи нестачу сировини. Це відкриває перед українськими виробниками нові експортні можливості.

На рис.1 наведено основні переваги виробництва біопалива в Україні.

Водночас важливо врахувати, що на європейському ринку зростає попит саме на біоетанол другого покоління (G2), який виготовляється з неїстівної сировини – наприклад, соломи або відходів деревини. Натомість в Україні наразі переважно виробляється біоетанол першої генерації (G1) з продовольчої сировини, такої як кукурудза. Це може стати бар'єром для розширення українського експорту в ЄС, оскільки Європа прагне мінімізувати ризики для продовольчої безпеки.

Мінімальна ціна біоетанолу, виробленого з пшеничної соломи і відходів кукурудзи становила 0,54 -0,57 дол. США/л) [14]. Поточні витрати на виробництво целюлозного етанолу в Європі вищі в 2,3 рази ніж у США [14]. Зменшення цих витрат полягає в удосконаленні технологічних етапів виробництва, широкомасштабній інтеграції процесу, зниженні вартості ферментів і використанні залишків лігніну для виробництва електроенергії. Екологічна та економічна доцільність виробництва біопалива першого покоління є сумнівною, оскільки вона залежить від сільськогосподарських культур, які використовують для виробництва продуктів харчування і потребують орної землі, добрив і води для росту рослин. Крім того, збільшення попиту на сировину призводить до зміни землекористування та вирубки лісів, прискорюючи зміну клімату та втрату

біорізноманіття. Виробництво біоетанолу все ще сильно залежить від субсидій та інших впливів на ринок, щоб економічно конкурувати з викопним паливом. Незважаючи на це, біопаливо другого покоління має більший потенціал для скорочення викидів парникових газів, ніж біопаливо першого покоління.



Рис. 1. Основні переваги виробництва біопалива в Україні (сформовано за даними [13])

некрохмальних полісахаридів проводили комплексом целюлолітичних ферментних препаратів Cellic STec2 виробництва Novonesis, Данія. Для гідролізу білкових компонентів використовували протеазу С, виробник Enzyme Biotech. Для зброджування суслу використовували комерційні сухі дріжджі *Sacharomyces cerevisiae* «Первак», надані компанією «Ензим», Львів.

Мета дослідження – визначити вплив процесу делігніфікації і ферментативного гідролізу некрохмальних полісахаридів зернових відходів на вихід етилового спирту.

Матеріали і методи. Для проведення досліджень використовували зернові відходи борошномельних підприємств – висівки пшеничні, відходи гороху (рис. 2), зернові відходи гречки (рис. 3), зернові відходи кукурудзи (рис. 4).

Гідроліз крохмалю здійснювали комерційними ферментними препаратами: альфа-амілаза (Tegamil BLHL) з витратами 2,0 од. активності на 1 г крохмалю та глюкоамілази (Tegamil GA 490) з витратами 8,0 од. активності на 1 г крохмалю, виробництва Peli Bio-Chem Technology (Shanghai) Co. Гідроліз



Рис. 2. Висівки пшеничні і відходи гороху



Рис. 3. Зернові відходи гречки

В роботі використовували загальноприйняті в спиртовій промисловості методи досліджень [15]. Для визначення умовної крохмалистості зернових відходів використовували поляриметричний метод (метод Еверса) [16], вміст крохмалю біологічним методом визначали бродильною пробою. Для цього 50 г зернових відходів змішували з водою в конічній колбі об'ємом 500 см³, доводили об'єм суміші до 250 см³ та проводили розрідження альфа-амілазою за температури 92°C 3 години. Розріджену масу охолоджували до температури 30°C, вносили оцукрюючий ферментний препарат

глюкоамілази, 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 °С 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.



Рис. 4. Відходи кукурудзи
(лушпиння, биті зерна, борошно, полова)

Вміст лігніну – прямим методом шляхом гідролізу сумішню концентрованої соляної кислоти та 72% сірчаної кислоти [17]. Кількість полісахаридів, що легко та важко гідролізуються, визначали за кількістю моносахаридів за відновлювальною здатністю, визначеною за методом Макена-Шорля [18]. Вміст спирту у зброджених дистилатах визначали ареометрично, масову концентрацію незброджених вуглеводів – колориметрично з антроновим реактивом [15].

Результати та обговорення. Склад зернових відходів борошномельних підприємств наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-хімічний склад зернових відходів

Показник	Висівки пшеничні	Зернові відходи гречки	Відходи кукурудзи	Відходи гороху
Вміст вологи, %	14,0±0,5	13,0±0,5	12,0±0,5	12,0±0,5
Вміст умовного крохмалю (поляриметричний метод), %	24,1±1,5	50,3±1,5	28,3±1,5	24,4±1,5
Вміст полісахаридів, що легко гідролізуються, % до а.с.р.	45,33±1,5	45,10±1,5	31,9±1,5	25,3±1,5
Вміст полісахаридів, що важко гідролізуються, % до а.с.р.	7,60±0,5	0,64±0,05	30,5±0,5	49,0±0,5
Вміст лігніну (модифікований метод ВНДІ ППром), % до а.с.р.	12,8±1,5	14,9±1,5	24,0±1,5	5,7±1,0

До вуглеводів, що легко гідролізуються, відносять моно-, ди-, трисахариди, а також полісахариди, що здатні руйнуватись під впливом слабких розчинів кислот, зокрема крохмаль та геміцелюлози. Полісахариди, які гідролізуються концентрованими мінеральними кислотами при температурі близько 20°C або розбавленими мінеральними кислотами при підвищеній температурі (160–190°C), відносять до важко гідролізованих. Зокрема в нашому досліді вони представлені целюлозою.

Як видно з даних табл. 1, найбільший вміст крохмалю мали зернові відходи гречки – до 50%, інша сировина мала приблизно однаковий вміст крохмалю (24–28%). Найбільша кількість целюлози була у відходах гороху і відходах кукурудзи. Але вміст целюлози у відходах гороху (49%) був значно завищеним через наявність в них білкових сполук, компоненти яких реагують з мідним реактивом методики визначення. Вміст лігніну найбільшим був у відходах кукурудзи (24%), у відходах гречки і висівках пшеничних його вміст становив 14,9% і 12,8% відповідно. У відходах гороху вміст лігніну був найменшим (5,7%).

Для встановлення виходу етилового спирту з 1 т сировини ми проводили ферментативний гідроліз крохмалю зернових відходів альфа-амілазою за температури 90

оС протягом 3 годин, оцукрення глюкоамілазою здійснювали одночасно з бродінням за температури 30°C. Перед зброджуванням в сусло вносили ферментний препарат протеази для розщеплення білкових речовин і утворення азотних сполук, що є джерелом азотного живлення для дріжджів. Тривалість бродіння була 72 години.

Результати зброджування різних типів відходів борошномельних підприємств наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Показники зброджування відходів борошномельних підприємств

Показник	Висівки пшеничні	Відходи кукурудзи	Зернові відходи гречки	Відходи гороху
Кількість виділеного CO ₂ , г	10,22±0,5	16,4±0,5	13,49±0,5	5,93±0,5
Вміст спирту в зрілій бражці, % об.	3,7±0,05	7,8±0,05	6,7±0,05	2,8±0,05
Вміст загальних вуглеводів, г/100см ³	0,47±0,02	0,24±0,02	0,52±0,02	0,43±0,02
Вміст крохмалю біологічним методом, %	23,59±1,5	27,4±1,5	41,28±1,5	17,94±1,5
Вихід спирту з т сировини, дал	14,88±0,05	19,31±0,05	26,80±0,05	11,12±0,05
Вихід спирту з т умовного крохмалю, дал	63,07±0,05	81,87±0,05	64,92±0,05	61,98±0,05

Зернові відходи гречки мають високий вміст крохмалю, визначений поляриметричним методом, становить 50,3% (таблиця 1), за біологічним методом його вміст є нижчим – 41,28%. В зернових відходах гороху крохмаль, визначений поляриметрично, також на 8% більший, ніж за біологічним методом. Це свідчить про наявність в сировині оптично активних сполук, здатних завищувати показник поляриметра. Для точності визначення вмісту крохмалю в даній сировині рекомендовано використовувати біологічний метод. Крохмаль в зернових відходах гречки складає близько 90% від кількості вуглеводів, що легко гідролізуються, що підтверджується і низьким вмістом целюлози – полісахариду, що важко гідролізується. Вміст крохмалю у відходах гороху становить не менш 70% від вмісту вуглеводів, що легко гідролізуються. Найбільший вихід спирту з 1 тони сировини показали зернові відходи гречки і кукурудзи – 26,8 дал і 19,3 дал. Вихід спирту з 1 т відходів гороху становив 11,12 дал.

Оскільки всі види сировини, окрім відходів гречки, мали високий вміст некрохмальних полісахаридів, що важко гідролізуються, то наступним етапом досліджень, було проведення їх ферментативного гідролізу комплексом целюлолітичних ферментних препаратів *Cellic Ctec2* для утворення зброджуваних дріжджами цукрів. Для цього проводили підкислення розрідженого альфа-амілазою сусла до pH 5,0–5,2, що є оптимальним для дії целюлолітичних ферментів, потім здійснювали його гідроліз за температури 50°C в присутності глюкоамілази, протеази і целюлазного комплексу протягом 4 годин, а далі сусло зброджували дріжджами за температури 30°C впродовж 72 годин. Гідромодуль приготування затору 1:3. Наважка сировини 50 г. Результати зброджування наведено в таблиці 3.

Проведення гідролізу целюлолітичним комплексом ферментних препаратів ефективно для сировини, що має високий вміст некрохмальних полісахаридів, а саме висівки пшеничних і відходів кукурудзи, вихід спирту при цьому збільшується на 3,1–4 дал (табл. 3). Після обробки відходів гороху целюлазним і протеазним комплексом ферментів, вихід спирту з 1 т сировини збільшився в 2,5 рази. Це пояснюється одночасним гідролізом білкових комплексів протеазою і некрохмальних полісахаридів целюлазою. Найнижчою є ефективність застосування додаткової обробки ферментними препаратами зернових відходів гречки через низький вміст в них некрохмальних полісахаридів.

Високий вміст лігніну у зернових відходах пшениці і кукурудзи (таблиця 1), який завдяки будові молекули полісахариду скріплює целюлозу і геміцелюлозу, заважає

проведенню ферментативного гідролізу. Відомо, що органосольвентна обробка лігніноцелюлозної сировини розчином етилового спирту в присутності сірчаної кислоти за високою температурою 120–140°C, руйнує лігнінові зв'язки і робить біомасу більш доступною до дії ферментів [19]. Тому нами для видалення лігніну і підвищення доступності целюлози було проведено попередню обробку зернових відходів 50% розчином етилового спирту і 3% концентрованої сірчаної кислоти за температури 100°C впродовж 3 годин. Оскільки в зернових відходах гречки і висівках пшеничних, вміст целюлози невисокий, а у відходах гороху показник полісахаридів, що важко гідролізуються, завищений через високий вміст білкових речовин, які заважають проведенню реакції, то було прийнято рішення проводити делігніфікацію суміші цих відходів і окремо відходів кукурудзи. Наважка сировини 50 г. Після делігніфікації здійснювали відгонку спирту, а в одержаний розчин після підлучення до рН 5,0 вводили ферменти целюлолітичного комплексу, витримували 2 години за температури 50°C і проводили зброджування. Гідромодуль приготування затору 1:10. Для порівняння робили ферментативний гідроліз суміші висівок пшеничних, зернових відходів гречки і гороху у співвідношенні 1:1:1 без попередньої делігніфікації. Результати наведено в таблиці 4.

Таблиця 3

**Показники зброджування відходів
після гідролізу целюлолітичним комплексом ферментів**

Показник	Висівки пшеничні	Зернові відходи гречки	Зернові відходи гороху	Відходи кукурудзи
рН замісу до підкислення	6,43±0,1	6,10±0,1	5,90±0,1	5,9±0,1
рН замісу після підкислення	5,03±0,1	5,10±0,1	5,00±0,1	5,0±0,1
Вміст зброджуваних вуглеводів без обробки комплексом ферментів, %	24,50±0,5	43,45±0,5	18,89±0,5	30,72±0,5
Вміст зброджуваних вуглеводів після обробки ферментами, %	28,73±0,5	44,71±0,5	43,80±0,5	35,12±0,5
Кількість виділеного CO ₂ , г	7,16±0,5	11,21±0,5	11,07±0,5	17,1±0,5
Вміст спирту в зрілій бражці, % об.	3,60±0,05	5,60±0,05	5,45±0,05	8,9±0,05
Вміст загальних вуглеводів, г/ 100см ³	0,19±0,02	0,56±0,02	0,35±0,02	0,17±0,02
Вихід спирту з т сировини, дал	18,00±0,05	28,00±0,05	27,25±0,05	21,95±0,05

Таблиця 4

Показники зброджування зернових відходів після органосольвентної делігніфікації

Показник	Суміш висівок пшеничних, відходів гречки і гороху		Відходи кукурудзи	
	Без делігніфікації	Після делігніфікації	Без делігніфікації	Після делігніфікації
Кількість виділеного CO ₂ , г	3,23±0,5	4,31±0,5	15,35±0,5	18,62±0,5
Вміст спирту в зрілій бражці, % об.	2,15±0,05	2,40±0,05	8,1±0,05	9,7±0,05
Вміст незброджених вуглеводів, г/ 100см ³	0,42±0,02	0,21±0,02	0,17±0,02	0,15±0,02
Вихід спирту з т сировини, дал	15,69±0,05	20,00±0,05	19,8±0,05	24,31±0,05

Як видно з даних таблиці 4, проведення попередньої органосольвентної делігніфікації зернових відходів борошномельних підприємств збільшує вихід етилового спирту з 1 т сировини на 4,3 дал, що пояснюється вивільненням лігніну з молекули некрохмального полісахариду під дією розчинника, випадінням його в осад та більшою ефективністю проведення гідролізу целюлози до зброджуваних цукрів комплексом целюлолітичних ферментних препаратів.

Висновки. Серед дослідженої нами сировини найбільший вміст крохмалю мали зернові відходи гречки – до 50%, в іншій сировині був приблизно однаковий вміст крохмалю (24–28%). Відходи кукурудзи і пшеничні висівки містили найбільшу кількість некрохмальних полісахаридів, зокрема целюлозу, які можна гідролізувати до зброджуваних цукрів. Гідроліз целюлолітичними ферментами ефективний для сировини, що має високий вміст некрохмальних полісахаридів, а саме висівки пшеничних і відходів кукурудзи, вихід спирту при цьому збільшується на 3,1–4 дал з 1 т сировини. Органосольвентна делігніфікація руйнує лігнінові зв'язки і робить біомасу більш доступною до дії ферментів, про що свідчить збільшення виходу спирту з 1 т на 4,3 дал.

Бібліографія

1. Ethanol Market Size, Share and Trends 2024 to 2034. Precedence Research. <https://www.precedenceresearch.com/ethanol-market>. 07.11.2024.
2. Renewable Fuels Association. Annual ethanol production (2024). <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>.
3. Pan S, Zayed HM, Wei Y, Qi X. Technoeconomic and environmental perspectives of biofuel production from sugarcane bagasse: current status, challenges and future outlook. *Ind Crops Prod.* 2022, 188, 115684.
4. Ruan Z, Wang X, Liu Y, Liao W. Corn. *Integr Process Technol Food Agric.* 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814138-0.00003-4>.
5. Da Silva, A.R.G., Errico, M., Rong, B.G. Systematic procedure and framework for synthesis and evaluation of bioethanol production processes from lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol Rep.*, 2018, 4, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.08.015>.
6. Данілова К. О. Порівняльна оцінка способів делігніфікації лігніноцелюлозної біомаси для виробництва біоетанолу другого покоління (огляд). *Продовольчі ресурси*, 2024, 23 (11), с. 61–72. <https://doi.org/10.31073/foodresources2024-22-07>.
7. Fan Guo-Zhi. Preparation of microcrystalline cellulose from rice straw under microwave irradiation. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2017, 22, 134.
8. Fernandes, M.C., Ferro, M.D., Paulino, A.F., Mendes, J.A., Gravitis, J., Evtuguin, D.V., et al. Enzymatic saccharification and bioethanol production from *Cynara cardunculus* pretreated by steam explosion. *Bioresource Technology*, 2015, 186, 309.
9. Joy, S. P., Kumar, A. A., Gorthy, S., Jaganathan, J., Kunappareddy, A., Gaddameedi, A. et al. Variations in structure and saccharification efficiency of biomass of different sorghum varieties subjected to aqueous ammonia and glycerol pretreatments. *Ind Crops Prod.*, 2021, 159. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113072>.
10. Li, X., Zheng, Y. Lignin-enzyme interaction: Mechanism, mitigation approach, modeling, and research prospects. *Biotechnol Adv.*, 2017, 35, 466–489. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.03.010>.
11. Naresh Kumar, M., Ravikumar, R., Thenmozhi, S., Kirupa Sankar, M. Development of natural cellulase inhibitor mediated intensified biological pretreatment technology using *Pleurotus florida* for maximum recovery of cellulose from paddy straw under solid state condition. *Bioresour Technol.*, 2017, 244, 353–361. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.105>.
12. Sharma, H. K., Xu, C., Qin, W. Biological pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuels and bioproducts: an overview. *Waste Biomass Valoriz.*, 2019, 10, 235–251.
13. Hamelinck, C. N., Hooijdonk, G., Faaij, A. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. *Biomass and Bioenergy.*, 2013, 28 (4), 384–410. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.09.002>.
14. Пришляк Н. В. Організаційно-економічний механізм виробництва біопалив із агробіомаси: теорія, методологія, практика. Дисертація на здобуття д.е.н. Вінницький національний аграрний університет, 2021, 468 с.
15. Sadhukhan, J., Martinez-Hernandez, E., Amezcua-Allieri, M. A., Aburto, J., Honorato, J. A. Economic and environmental impact evaluation of various biomass feedstock for bioethanol production and correlations to lignocellulosic composition. *Bioresource Technology Reports.*, 2019, 7, 100230. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100230>.
16. Полигаліна Г. В. Технохімічний контроль спиртового і дікєро-горілочного виробництва. М.: Колос, 1999, 333 с. *Tehnohimicheskiy control spirtovogo i likero-vodochnogo proizvodstv [Technochemical control of alcohol and liquor production]*. М: «Kolos», 1999. 333 p.
17. ДСТУ 46.045.2003 Зерно. Методи визначення умовної крохмалистості. Міністерство аграрної політики України. Київ, 2004. 23 с.
18. Linskens, H. F., Tracey, M. V., Beiss, U., Bendall, F. *Modern Methods of Plant Analysis*. Publisher: Springer Berlin, Heidelberg. 2013, vol. 6, 332 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-94878-7>

19. Official Method GS 1-5. Raw Sugar Methods – The Determination of Reducing Sugars in Cane Raw Sugar by the Luff-Schoorl Procedure. ICUMSA, 2009.

20. Danilova, K., Oliynichuk, S., Grushetskiy, R., Grinenko, I. Use of lignocellulose raw materials in the production of bioethanol. *Journal of Chemistry and Technologie*, 2025, 33 (1), P. 177–186. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v33i1.313927>.

References

1. Ethanol Market Size, Share and Trends 2024 to 2034. Precedence Research. <https://www.precedenceresearch.com/ethanol-market>. 07.11.2024.

2. Renewable Fuels Association. Annual ethanol production (2024) <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>.

3. Pan S, Zabed HM, Wei Y, Qi X. (2022) Techno economic and environmental perspectives of biofuel production from sugarcane bagasse: current status, challenges and future outlook. *Ind Crops Prod.*, 188, 115684.

4. Ruan Z, Wang X, Liu Y, Liao W. (2019) Corn. *Integr Process Technol Food Agric*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814138-0.00003-4>.

5. Da Silva, A.R.G., Errico, M., Rong, B.G. (2018) Systematic procedure and framework for synthesis and evaluation of bioethanol production processes from lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol Rep.*, 4, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.08.015>.

6. Danilova, K. O. (2024) Porivnyalna otsinka sposobiv delignifikatsii ligninotseluloznoi biomasy dlya vyrobnytstva bioetanolu drugogo pokolinnya (oglyad) [Comparative assessment of the delignification methods of lignocellulose biomass for the second generation bioethanol production (overview)] *Prodovolchi resursy* [Food Resources], 23 (11), p. 61–72. <https://doi.org/10.31073/foodresources2024-22-07>.

7. Fan Guo-Zhi. (2017) Preparation of microcrystalline cellulose from rice straw under microwave irradiation. *J. Appl. Polym. Sci.*, 22, 134.

8. Fernandes, M. C., Ferro, M. D., Paulino, A. F., Mendes, J. A., Gravitis, J., Evtuguin, D. V., et al. (2015). Enzymatic saccharification and bioethanol production from *Cynara cardunculus* pretreated by steam explosion. *Bioresource Technology*, 186, 309.

9. Joy, S. P., Kumar, A. A., Gorthy, S., Jaganathan, J., Kunappareddy, A., Gaddameedi, A. et al. (2021). Variations in structure and saccharification efficiency of biomass of different sorghum varieties subjected to aqueous ammonia and glycerol pretreatments. *Ind Crops Prod.*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113072>.

10. Li, X., Zheng, Y. (2017). Lignin-enzyme interaction: Mechanism, mitigation approach, modeling, and research prospects. *Biotechnol Adv.*, 35, 466–489. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.03.010>.

11. Naresh Kumar, M., Ravikumar, R., Thenmozhi, S., Kirupa Sankar, M. (2017) Development of natural cellulase inhibitor mediated intensified biological pretreatment technology using *Pleurotus florida* for maximum recovery of cellulose from paddy straw under solid state condition. *Bioresour Technol.*, 244, 353–361. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.105>.

12. Sharma, H.K., Xu, C., Qin, W. (2019). Biological pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuels and bioproducts: an overview. *Waste Biomass Valoriz.*, 10, 235–251.

13. Hamelinck, C. N., Hooijdonk, G., Faaij, A. (2013) Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. *Biomass and Bioenergy*, 28 (4), 384–410. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.09.002>.

14. Pryshlyak, N. V. (2021). Organizatsiyno-ekonomichniy mehanizm vyrobnytstva biopalyv iz agrobiomasy: teoriya, metodologiya, praktyka [Organizational and economic mechanism of biofuel production from agrobiomass: theory, methodology, practice] Dissertation for the degree of Doctor of Economics. Vinnytsia National Agrarian University, 468 p.

15. Sadhukhan, J., Martinez-Hernandez, E., Amezcua-Allieri, M. A., Aburto, J., Honorato, J. A. (2019). Economic and environmental impact evaluation of various biomass feedstock for bioethanol production and correlations to lignocellulosic composition. *Bioresource Technology Reports.*, 7, 100230. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100230>.

16. Polygalina, G. V. (1999). Technohimichnyi kontrol spyrtovogo i likero-gorilchanogo vyrobnytstva [Technochemical control of alcohol and liquor production]. M.: Kolos, 333 p.

17. DSYU 46.045.2003 Zer№ Metody vyznachennya umovnoi krohmalyystosti. [Grain. Methods for determining conditional starch content]. Ministry of Agrarian Policy of Ukraine. Kyiv, 2004. 23 p.

18. Linskens, H. F., Tracey, M. V., Beiss, U., Bendall, F. (2013). *Modern Methods of Plant Analysis*. Springer Berlin, Heidelberg, vol. 6, 332 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-94878-7>.

19. Official Method GS 1-5. (2009). Raw Sugar Methods – The Determination of Reducing Sugars in Cane Raw Sugar by the Luff-Schoorl Procedure. ICUMSA.

20. Danilova, K., Oliynichuk, S., Grushetskiy, R., Grinenko, I. 2025. Use of lignocellulose raw materials in the production of bioethanol. *Journal of Chemistry and Technologie*, 2025, 33 (1), P. 177–186. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v33i1.313927>.