

А. О. Шкоп, канд. техн. наук, докторант, Н. Г. Пономарьова, канд. техн. наук, доцент,
О. В. Шестопапов, канд. техн. наук, доцент,
А. С. Босюк, д-р філософії, старший викладач, Д. М. Войтенко аспірант,
В. С. Бутко, асистент

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ ЗОВНІШНІХ БАРДОНАКОПИЧУВАЧІВ У ПАЛИВНІ ПЕЛЕТИ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: післяспиртова барда, паливні пелети, бардонакопичувачі, утилізація відходів, механічне зневоднення, термічна сушка, грануляція, біопаливо, центрифугування.

Вступ. Спиртова промисловість є однією з ключових галузей, що забезпечує виробництво етанолу, однак вона генерує значні обсяги побічних продуктів, зокрема післяспиртової барди (ПСБ). Цей відхід, що накопичується у великих кількостях у зовнішніх бардонакопичувачах, створює серйозні екологічні та економічні виклики через свою високу вологість, низький вміст цінних речовин і складність транспортування. Традиційні методи утилізації барди, такі як виробництво кормів, добрив чи біогазу, мають обмеження, пов'язані з утворенням стічних вод, високими енерговитратами та непридатністю для переробки відпрацьованої барди, яка накопичувалася роками і містить механічні домішки. У той же час, зростання попиту на альтернативні джерела енергії та необхідність вирішення екологічних проблем стимулюють пошук нових підходів до утилізації таких відходів. Одним із перспективних напрямів є переробка післяспиртової барди у паливні пелети, які можуть використовуватися як екологічно чисте біопаливо з високою теплотворною здатністю. Ця стаття присвячена розробці технології переробки відпрацьованої барди з зовнішніх бардонакопичувачів у паливні пелети, що включає етапи механічного зневоднення, термічної сушки та грануляції, а також визначення оптимальних параметрів процесу для забезпечення економічної та екологічної ефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наразі на більшості спиртових заводів світу барду переробляють різними способами, переважно для виробництва кормів. Транспортування непереробленої барди є економічно невигідним через великий об'єм рідини та відносно низький вміст цінних речовин, що робить перевезення цих відходів нерентабельним. Технології переробки барди умовно поділяються на чотири основні схеми [1, 2]:

- випарні станції з отримання сухих кормів чи добрив [3];
- аеробною мікробіологічною переробкою рідкої фази з отриманням кормових дріжджів [2];
- метантанками з отриманням біогазу [2];
- комбіновані схеми [1].

Комбіновані технологічні схеми базуються на перевірених і ефективних методах, які включають: відокремлення рідкої та твердої фаз за допомогою центрифуг [4, 5], культивування кормових дріжджів на відповідному субстраті [6], сушіння отриманої

продукції з подальшим використанням сухого залишку як добрива [7] або як кормової добавки для тварин [8, 9].

При розділенні післяспиртової барди в гравітаційному полі шляхом відстоювання або центрифугування утворюються осад і освітлена барда. Застосовуючи спільне або роздільне зневоднення цих компонентів, можна отримати чотири типи кормових продуктів [10–12]:

- висушений осад (DDG – Distillers Dried Grains);
- висушена освітлена барда (DDS – Distillers Dried Solubles);
- висушена суміш осаду та барди (DDGS – Distillers Dried Grains with Solubles);
- згущена освітлена барда з вмістом сухих речовин 30–40 % (CDS – Condensed Distillers Solubles).

Водночас варто зазначити, що переробка барди на сухі кормові добавки є доцільною лише для свіжої сировини та потребує значних енергетичних витрат на процес сушіння.

Ключовою проблемою залишається пошук ефективних способів утилізації відпрацьованих бардонакопичувачів, де відходи спиртової промисловості накопичувалися протягом багатьох років і стали непридатними для традиційного використання.

Обмеженість енергетичних ресурсів для опалення, виробництва технологічної пари та інших енергетичних потреб, а також екологічні виклики, пов'язані з традиційною енергетикою, сприяють зростанню популярності твердих органічних видів біопалива.

Аналіз наукової літератури показує, що сучасне біопаливо активно виготовляється з різних органічних відходів [13, 14], зокрема:

- відходів сільськогосподарських культур, таких як солома [15], бадилля кукурудзи [16], лузга насіння, рисове лушпиння [13] тощо;
- відходів деревообробної промисловості та деревини [13, 17, 18];
- відходів тваринницьких комплексів, включаючи відходи великої рогатої худоби та птахофабрик [19];
- органічних осадів стічних вод та інших органічних шламів [20].

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на широкий спектр методів переробки післяспиртової барди, що застосовуються у світовій практиці, проблема розробки економічно вигідної технології залишається актуальною, особливо для українських виробників етанолу, які часто не мають доступу до сучасних технологій утилізації органічних відходів. Світовий досвід демонструє, що одним із перспективних напрямів використання барди є її переробка на корми для тварин [8, 9]. Зокрема, виробництво кормових дріжджів [6] є поширеним методом, проте після цього процесу утворюється післядріжджова барда, яка є висококонцентрованою стічною водою. Переробка барди на добрива чи біогаз також супроводжується утворенням стічних вод. Інший спосіб утилізації – зрошення земель – застосовується лише окремими заводами як тимчасовий захід і має численні недоліки.

Ці обмеження вказують на необхідність пошуку нових підходів до утилізації багатотонажних відходів післяспиртової барди, що накопичуються у зовнішніх шламонакопичувачах спиртових заводів. Одним із перспективних рішень є переробка барди у паливні гранули. Головна перевага цього методу полягає у можливості використання відпрацьованої барди, яка через економічну недоцільність або

забруднення механічними домішками та пилом не придатна для інших методів утилізації, таких як переробка на корми чи добрива. Суха гранульована барда є екологічно безпечним біопаливом із теплотворною здатністю, порівнянною з високоякісною деревиною або деревним вугіллям, і зручна для дозування у твердопаливних котлоагрегатах.

В попередніх дослідженнях [21] було виявлено, що барда шламонакопичувачей є полідисперсною, містить тверді частинки та органічні речовини сухого залишку в кількості 50–60 г/л із вологістю 85–90 %. Досліджено закономірність вологовіддачі в процесі сушіння барди та показано можливість доведення зневодненої на центрифугах барди до вологості 10–14 %, якої достатньо для формування гранульованих паливних пелет. Визначено теплотворну здатність отриманих пелет, яка для зразків різних спиртових заводів склала 4600–5550 ккал/кг. На підставі проведених досліджень запропоновано ресурсозберігаючу технологію переробки барди в пелети та схему вузлів механічного зневоднення з використанням сучасних центрифуг. Дана стаття є продовженням досліджень, описаних в [21].

Новизна. Новизна дослідження полягає у розробці технологічного процесу переробки післяспиртової барди з зовнішніх бардонакопичувачів у паливні пелети, що дозволяє утилізувати відходи, непридатні для інших методів переробки. Запропонована технологія включає послідовне виконання етапів: видобуток барди за допомогою земснаряду, механічне зневоднення на центрифугах, термічне сушіння у барабанній сушарці та грануляцію для отримання паливних пелет із вологістю 5–12 %. Особливістю є адаптація процесу до барди з високим вмістом механічних домішок та низьким вмістом розчинених речовин, що раніше не розглядалося в літературі як сировина для біопалива. Експериментально визначено кінетику сушіння барди, оптимальні параметри механічного зневоднення та теплотворну здатність кінцевого продукту, що становить 17,9–19,9 МДж/кг, порівнянну з деревними пелетами. Також новизною є розрахунок енерговитрат та оптимізація роботи сушильного обладнання для забезпечення економічної ефективності процесу.

Мета і задачі дослідження. Мета даного дослідження полягає у розробці економічно ефективної технології переробки післяспиртової барди із зовнішніх бардонакопичувачів у паливні пелети з високою теплотворною здатністю, придатні для використання в твердопаливних котлоагрегатах. Це потрібно для вирішення проблеми утилізації багатотонажних відходів спиртової промисловості, зменшення екологічного навантаження від накопичення барди у зовнішніх шламонакопичувачах, а також створення альтернативного джерела біопалива для забезпечення енергетичних потреб спиртових заводів та інших промислових об'єктів.

Для досягнення зазначеної мети мали вирішити наступні завдання:

- визначити оптимальні параметри транспортування згущеної барди з бардонакопичувача до модуля переробки, включаючи використання земснаряду та пульпопроводу;
- розробити технологію механічного зневоднення барди до вологості 70–75 % з подальшим очищенням від механічних домішок;
- визначити кінетику сушіння барди в барабанній сушарці та оптимізувати параметри термічної сушки для досягнення вологості кінцевого продукту 5–12 %, придатного для грануляції.

Викладення основного матеріалу

1. Методика дослідження процесу сушіння післяспиртової барди

Термічна сушка барди після механічного зневоднення в центрифугі здійснювалася контактної сушарці. Контактну сушарку було виготовлено на базі шахтної печі СНОЛ. Нагрів нержавіючої колби сушарки здійснювався електричною спіраллю та автоматично підтримувалася температура $t \approx 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ під час роботи сушарки. Контроль температури колби здійснювався термопарами, розташованими внизу (T_H) та вгорі (T_B) колби.

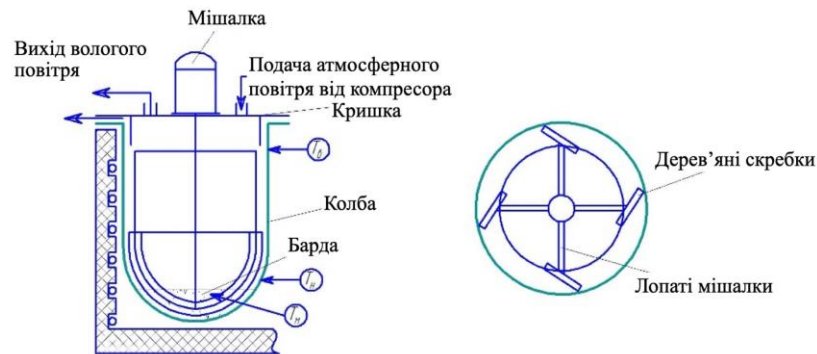


Рисунок 1 – Контактна сушарка

Перемішування барди в процесі термосушіння здійснювалося мішалкою якірного типу. На кожній із 4-х лопатей мішалки були змонтовані дерев'яні скребки, підігнані за профілем колби.

Обертання мішалки здійснювалося від мотор-редуктора ($N_{ел} = 0,75\text{ кВт}$, $n_{вих} = 11\text{ об/хв}$), змонтованої на кришці підйомної печі.

В середину сушарки подавалося атмосферне повітря вентилятором. Вихід вологого повітря проводився через отвори в кришці та зазорами між кришкою та колбою.

Для термічного сушіння відбирали згущену барду із зовнішнього накопичувача Артемівського спиртзаводу (рис. 2а). Перед термічним сушінням осад з накопичувача був зневоднений механічно в центрифугі Ecomash SHS 521A-113 (рис. 2б) до вологості 70–75 %.



Рисунок 2 – Фотографії відбору барди із бардонакопичувача (а) та центрифугальної установки Ecomash SHS 521A-113 (б)

2. Результати дослідження термічної сушки барди

Під час експериментальних досліджень було отримано кінетику сушіння осаду центрифуги після зневоднення ПСБ початковою вологістю 70,35 %

Таблиця 1 – Зміна абсолютної та відносної вологи осаду ПСБ

Час сушіння, t, хв	Абсолютна вологість, $W_{абс}$, кг/кг	Відносна вологість, $W_{відн}$, %
0	2,37	70,35
45	1,11	66,35
70	1,073	52,57
145	0,97	51,48
190	0,52	34,3
240	0,136	12,0

За даними табл. 1 побудовано залежність зміни абсолютної вологості матеріалу від часу (рис. 3).

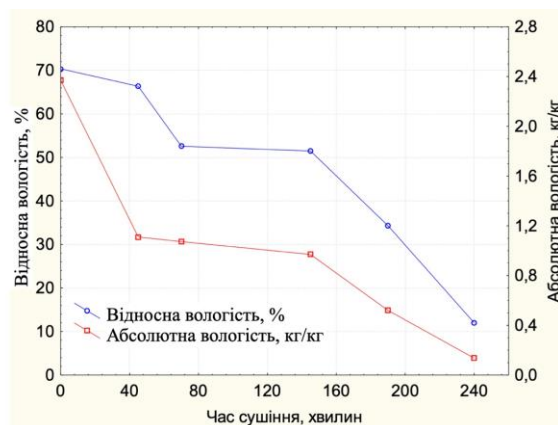


Рисунок 3 – Зміна абсолютної вологості $W_{абс}$ у часі t

Із залежності абсолютної вологості від часу ми можемо виділити два періоди сушіння: період сталої швидкості та період падіння швидкості висушування матеріалу.

Тривалість усього періоду сушіння визначають, як суму тривалості в період сталої швидкості та тривалості в період падаючої швидкості.

Період сталої швидкості сушіння визначають за формулою 1:

$$\tau_1 = \frac{\omega_1 - \omega_{кр}^1}{C}. \quad (1)$$

Період падаючої швидкості визначається за формулою 2:

$$\tau_2 = \frac{\omega_{кр}^1 - \omega_p}{C} \ln \frac{\omega_{кр}^1 - \omega_p}{\omega_2 - \omega_p}, \quad (2)$$

де ω_1 , ω_2 , ω_p – початкова, кінцева та рівноважна вологість матеріалу, 1 кг вологи на 1 кг сухої речовини; $\omega_{кр}^1$ – перша критична вологість матеріалу (наприкінці першого періоду сушіння).

Після експериментальних вимірів кількості випареної вологи в часі знаходиться коефіцієнт сушіння, який визначається за формулою 3:

$$C = \frac{W}{\tau \cdot G_c}, \quad (3)$$

де W – кількість випареної вологи, кг; τ – тривалість сушіння, сек; G_c – маса сухої речовини, кг.

Експеримент показує, що в початковий момент першого періоду сушіння вологість складала 2,37 кг/кг, через 50 хвилин або 3000 секунд (наприкінці першого періоду сушіння) вона стала 1,073 кг/кг. Тобто випарувалося води $W = 2,37 - 1,073 = 1,297$ кг/кг. Маса сухої речовини приймається $G_c = 1,0$ кг.

Тому, згідно формули 3 коефіцієнт сушіння складає:

$$C = \frac{1,297}{3000 \cdot 1,0} = 4,323 \cdot 10^{-4} \text{ 1/сек.}$$

Відповідні вологості набувають наступні значення:

$\omega_1 = 3,0$ кг/кг – таку вологість планується отримати для живлення сушарки. Це 75 % відносної вологості для вивантаженого із центрифуги осаду.

$\omega_{кр}^1 = 1,073$ кг/кг – критична вологість матеріалу в кінці першого періоду сушіння.

$\omega_2 = 0,136$ кг/кг – кінцева вологість висушеного матеріалу.

$\omega_p = 0,111$ кг/кг – рівноважна вологість отримана експериментально після сушіння близько 12 годин.

У підсумку згідно формул 1 та 2 визначаємо:

$$\tau_1 = \frac{\omega_1 - \omega_{кр}^1}{C} = \frac{3,0 - 1,073}{4,323 \cdot 10^{-4}} = 4457,6 \text{ сек};$$

$$\tau_2 = \frac{\omega_{кр}^1 - \omega_p}{C} \ln \frac{\omega_{кр}^1 - \omega_p}{\omega_2 - \omega_p} = \frac{1,073 - 0,111}{4,323 \cdot 10^{-4}} \ln \frac{1,073 - 0,111}{0,136 - 0,111} = 8122,6 \text{ сек.}$$

Тоді, сумарний час складає:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = 4457,6 + 8122,6 = 1,258 \cdot 10^4 \text{ сек} = 3,494 \text{ год.}$$

3. Розрахунок процесу сушки барди для виробництва пелет

Проведено технологічний розрахунок процесу сушіння робочих умов, тобто для барабанної сушарки з діаметром барабана 1500 мм, довжиною барабана 9000 мм. В ре-

зультаті встановлено, що середня витрата матеріалу, що висушується, по перерізу барабана повинна становити 2586,18 кг/год.

Тоді середній час перебування матеріалу в барабані для робочих умов процесу $\tau = 0,9836$ годин, при $\psi = 0,2$ – ступінь заповнення барабана.

Бачимо, що необхідний час тривалості сушіння для 1000 кг/год висушеної барди $\tau = 3,94$ годин, а для робочих умов дійсної барабанної сушарки (діаметр барабана 1500 мм, довжина барабана 9000 мм) час сушіння $\tau = 0,9836$ годин. Звідси випливає, що для забезпечення умов сушіння необхідно знизити подачу живлення в сушарку $\approx$ в 3,5 рази. Тобто, до продуктивності сухої речовини в живленні 285,7 кг/год, а по вологому до 1142,85 кг/год.

Додатково проаналізовано приблизні енерговитрати на термосушку барди в барабанній сушарці Артемівського заводу, живлення печі якої виробляється пелетами з лушпиння соняшника:

1. Витрата пелет $\Pi = 160,0$ кг/год. Теплотворна здатність пелетів $q_p = 17,9 \div 19,9$ МДж/кг.

2. Витрата живлення барабанної сушарки по сухій речовині $G_{\text{сyx}} = 400,0$ кг/год.

3. Вологість живлення, що входить у барабан $W_1 = 65,0$ %.

4. Вологість висушеного продукту $W_2 = 7,5$ %.

5. Діаметр барабану 2500 мм, довжина барабана 6000 мм.

Потужність тепла, яку виробляють пелети при спалюванні

Прийнято середнє значення $q_p = 19,0$ МДж/кг

$$P = \frac{\Pi \cdot q_p}{3600} = \frac{160,0 \cdot 19,0}{3600} = 0,844 \text{ МВт.} \quad (4)$$

Розрахунок кількості випаровуваної в барабані води

Витрата масової води, що випаровується, визначається з рівняння:

$$W = G_{\text{сyx}} \cdot \left(\frac{W_1}{100 - W_1} - \frac{W_2}{100 - W_2} \right) = 400,0 \cdot \left(\frac{65,0}{100 - 65,0} - \frac{7,5}{100 - 7,5} \right) = 710,417 \text{ кг/год.} \quad (5)$$

Потрібна для випаровування води потужність обчислюється за формулою 6:

$$Q = \frac{q \cdot W}{3600} = \frac{2,8683 \cdot 710,417}{3600} = 0,566 \text{ МВт.} \quad (6)$$

Питома витрата тепла на сушіння 1 кг барди згідно формули 7 дорівнює:

$$q = 2868,3 \text{ кДж/кг} = 2,8683 \text{ МДж/кг.} \quad (7)$$

Потужність, що генерується при спалюванні пелет, більша, ніж потрібна потужність для сушіння барди діючого виробництва.

Однак, необхідно продовжити оптимізацію за витратою пелет, подачі повітря для зниження втрат тепла з аспірацією (зниження тиску повітря в барабанній сушарці) барди із зовнішнього накопичувача.

4. Аналіз обсягів утилізації барди зовнішнього накопичувача

Розрахунок кількості барди в 1-му накопичувачі та час виїмки:

- Допустимо $V_{\text{накоп}} = 20000 \text{ м}^3$, глибина 6 м.
- Ступінь заповнення 85...90 %, тобто. Об'єм згущеної барди $W = 85 \%$ складає $V_{\text{п}} = 17000...18000 \text{ м}^3$, або сухої барди 2550...2700 т.
- Понтон вибирає із 6 м глибини 5 м, тобто. $5/6 V_{\text{п}} = 14167...15000 \text{ м}^3$, або ~ 2250 т сухої барди з одного відстійника.
- Інші 2700 т – 2250 т = 450 т обирає будівельна техніка як замерзлий ґрунт у зимові місяці.
- При роботі центрифуг у 3-х продуктовому режимі вихід завислих речовин у кек буде $\geq 0,85$, відповідно вихід барди в пелету складе $2250 \text{ т} \cdot 0,85 = 1912,5 \text{ т}$ сухої барди з одного накопичувача об'ємом 20000 м^3 .
- При продуктивності 9...10 т сухої барди за добу час переробки 1-го накопичувача $V_{\text{накоп}} = 20000 \text{ м}^3$ буде складати:
 $(1912,5...2295) : (9...10) = 212...230 \text{ діб} = 7...8 \text{ міс.} + 1 \text{ місяць у зимовий період будівельної техніки.}$
- Загальна кількість сухої барди з одного накопичувача з урахуванням переробленої в пелети складе: $1912,5 \text{ т} + 450 \cdot 0,14 = 1975,5 \text{ т}$ або з урахуванням 5 % вологості готових пелет ~ 2080 т.

Для організації термосушіння в обсязі 1000 кг/годину по сухій барді (з вихідною вологістю барди ~75 %) необхідні додаткові потужності до сушарки діаметром 1,5 м, довжиною 9 м. Для термосушіння барди продуктивністю 1 т/годину по сухому рекомендується замовити пелетний теплогенератор потужністю $N \sim 2 \text{ МВт}$, якщо буде використана сушарка діаметром 1,5 м, то теплогенерація становитиме $2 \text{ МВт} = 0,6 \text{ МВт} + 1,4 \text{ МВт}$.

В процесі гранулювання температура пелет піднялася до 90 °С, після охолодження гранул барди на повітрі вологість пелет з барди склала 5 %. Зовнішній вигляд гранул із барди зовнішнього накопичувача представлений на рис 4.



Рисунок 4 – Фотографія гранул паливних пелет із барди зовнішнього накопичувача діаметром 3 мм

Визначено теплотворну здатність пелет [21], отриманих після гранулювання зневодненої барди, яка для зразків різних спиртових заводів склала 4600–5550 ккал/кг (17,9–19,9 МДж/кг).

5. Розробка технології переробки післяспиртової барди зовнішнього бардонакопичувача

Зважаючи на те, що згущений продукт барди, що зберігається у зовнішніх накопичувачах спиртзаводів, містить меншу кількість розчинених речовин (у тому числі білків), ніж свіжа барда і має високу теплотворну здатність, доцільно використовувати згущений продукт барди із зовнішніх накопичувачів як сировину для паливних пелет або мінеральних добрив.

Розрахована якісно-кількісна схема переробки барди наведено на рис. 5. На рис. 6–10 наведено ескізи компонування обладнання з вилучення барди із зовнішнього накопичувача та схема Модуля механічного зневоднення барди, розробленого на ТОВ «НТЦ «Екомаш».

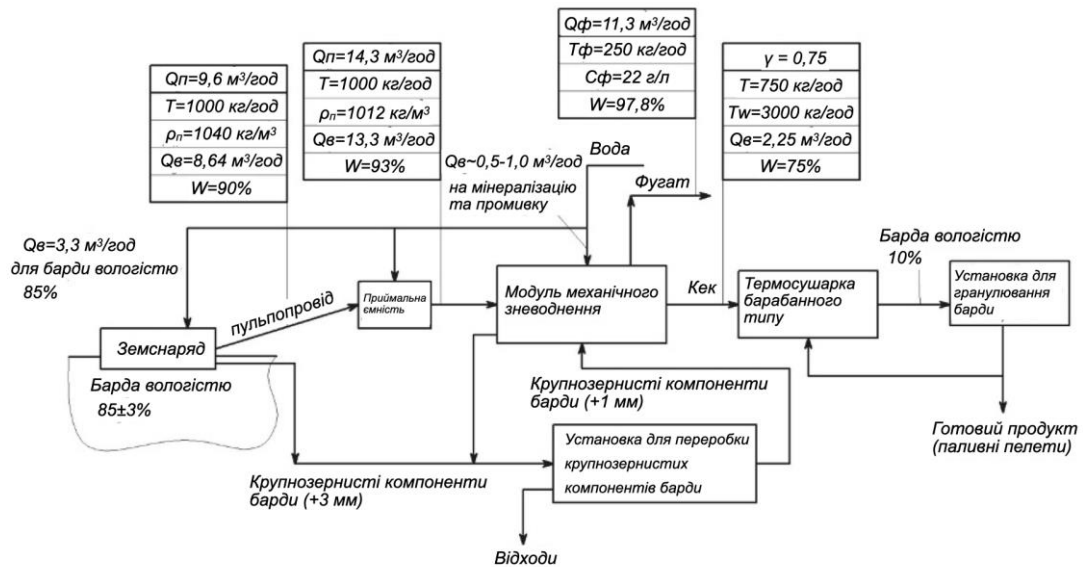


Рисунок 5 – Якісно-кількісна схема переробки барди із зовнішнього накопичувача:

Q_v – витрата води, $\text{м}^3/\text{год}$; Q_p – витрата пульпи барди, $\text{м}^3/\text{год}$; T – продуктивність по твердому, $\text{кг}/\text{год}$; ρ_p – щільність пульпи барди, $\text{кг}/\text{м}^3$; W – вологість барди; Q_f – витрата фугату, $\text{м}^3/\text{год}$; T_f – винос твердого у фугат, $\text{кг}/\text{год}$; C_f – вміст твердого у фугаті, $\text{г}/\text{л}$; γ – вихід твердого в осад; T_w – продуктивність по вологому осаді, $\text{кг}/\text{год}$

Згідно запропонованої схеми барда із зовнішнього шламонакопичувача видобувається за допомогою земснаряду (рис. 6) з вологістю 85 % розбавляється водою до 93 % та подається у пульпопровід, який транспортує її до приймальної ємності з мішалкою (рис. 7). Далі барда зневоднюється на центрифугах Модуля механічного зневоднення барди (рис. 8, рис. 9) до приблизно 75 %. Осад центрифуг подається в барабанну сушарку (рис. 10), де відбувається висушування барди до 10–12 %. В такому вигляді барда гранулюється в паливні пелети.

Відходи класифікації барди за класами 3 мм, 1 мм складуються разом із бардою, витягнутою в зимовий період, на окремий майданчик для поділу барди від механічних домішок, після цього барда повертається у виробництво пелет.

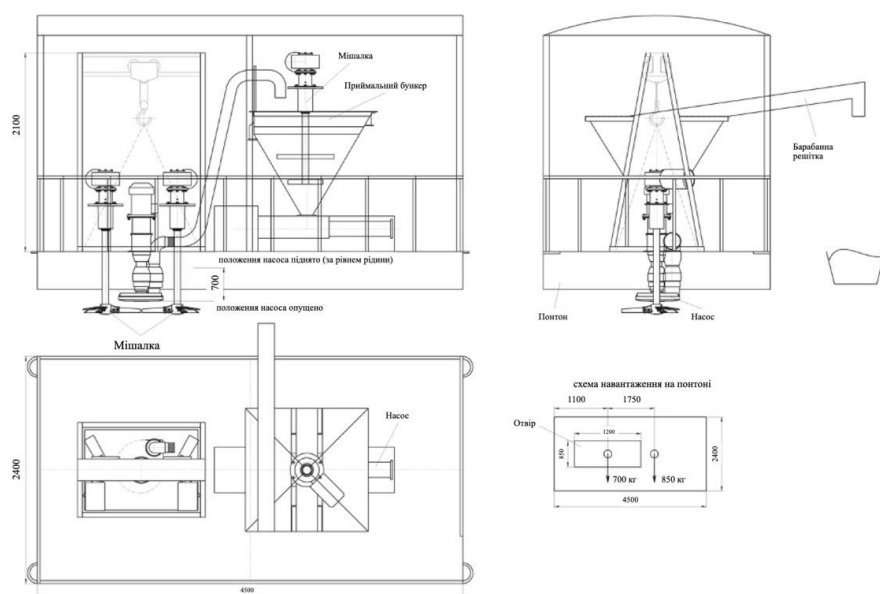


Рисунок 6 – Ескіз земснаряду для видобування барди з бардонакопичувача

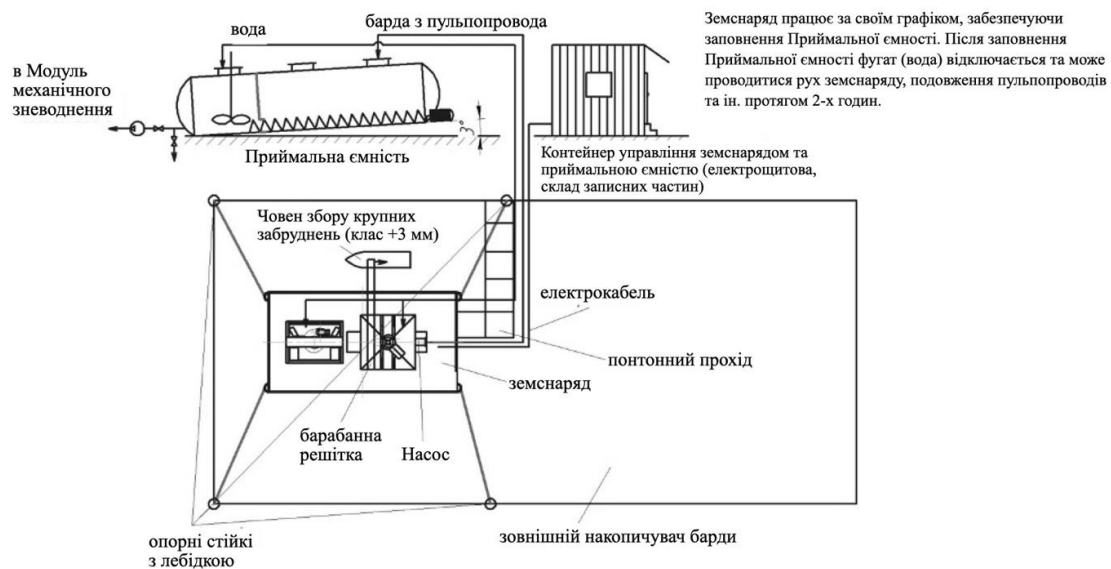


Рисунок 7 – Схема видобутку барди із зовнішнього накопичувача

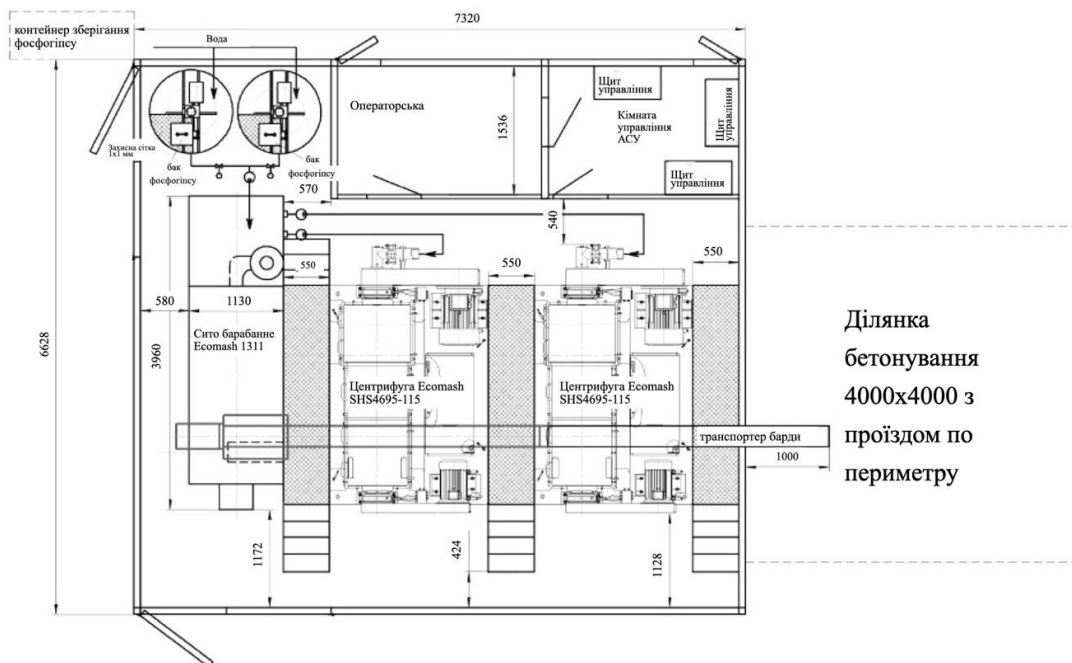


Рисунок 8 – Компонування Модуля механічного зневоднення барди вид зверху з центрифугами Ecomash SHS 521S-113, що працюють у трипродуктовому режимі

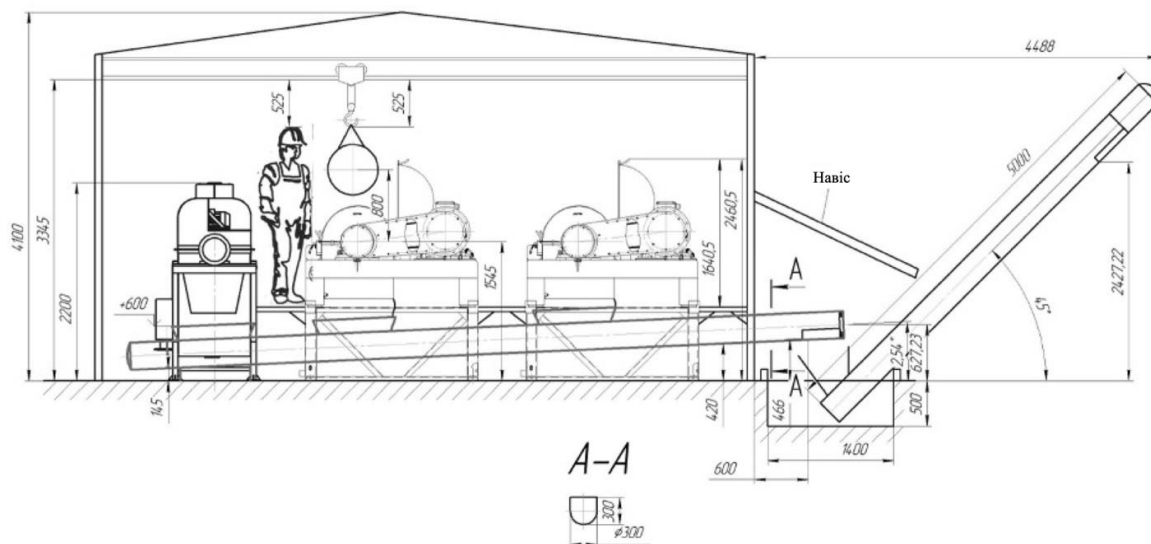


Рисунок 9 – Компонування Модуля механічного зневоднення барди ТОВ «НТЦ «Екомаш» вид спереду

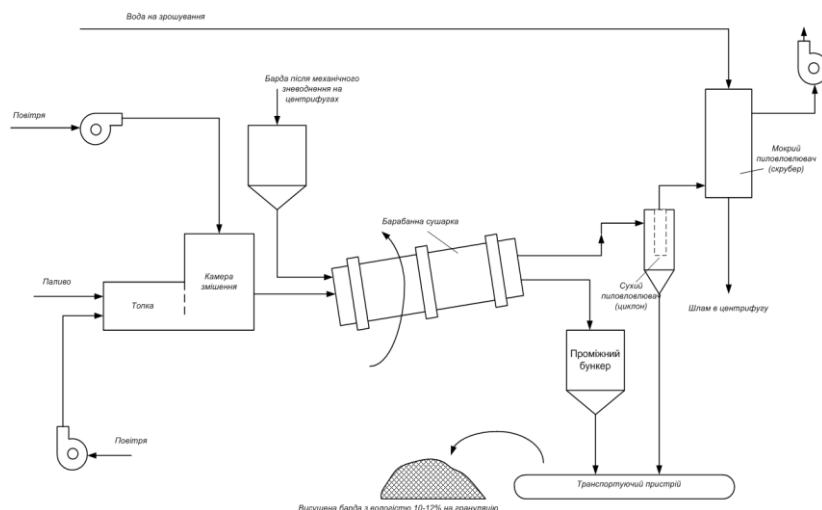


Рисунок 10 – Схема роторної прямоточної сушарки барабанного типу

Таким чином, запропоновані технологічні рішення та устатковування є перспективними та дають змогу налагодити виробництво паливних пелет з ПСБ шламонакопичувачей та мають наступні переваги для спиртових заводів України:

- дозволяють вивільнити відпрацьовані бардонакопичувачі від ПСБ та позбутися необхідності будувати нові, що в свою чергу призводить до зменшення впливу на довкілля;
- перетворити відходи ПСБ, які не мають цінність для переробки у кормові добавки чи добрива у цінний продукт, який може бути використаний на самому виробництві спирту в якості альтернативного палива для отримання пари;
- запропонована технологія не потребує додаткового тепла на процес висушування барди у разі використання отриманих пелет для енергозабезпечення сушарки.

Висновки. За результатами проведеного дослідження розроблено технологію переробки післяспиртової барди з зовнішніх бардонакопичувачів у паливні пелети, що дозволяє ефективно утилізувати відходи спиртової промисловості, непридатні для традиційних методів переробки.

Запропонована технологічна схема включає видобуток барди за допомогою земснаряду, її транспортування пульпопроводом, механічне зневоднення на центрифугах до вологості 70–75 %, термічну сушку в барабанній сушарці до вологості 10–12 % та подальшу грануляцію. Експериментально визначено кінетику сушіння барди, яка складається з двох періодів – постійної та падаючої швидкості, що дозволило оптимізувати тривалість процесу сушки до 3,494 години для 1000 кг/год сухої барди. Отримані паливні пелети мають теплотворну здатність 17,9–19,9 МДж/кг, що порівнянно з деревними пелетами, та вологість 5 % після охолодження, що робить їх придатними для використання в твердопаливних котлоагрегатах.

Розраховано, що переробка барди з накопичувача об'ємом 20000 м³ займає 7–8 місяців при продуктивності 9–10 т/добу сухої барди, з урахуванням зимового періоду для видобутку залишків будівельною технікою. Загальна кількість отриманої сухої барди становить приблизно 2080 т з одного накопичувача. Запропонована технологія є економічно обґрунтованою, оскільки дозволяє знизити енерговитрати шляхом оптимізації подачі сировини та використання пелетного теплогенератора потужністю 2 МВт.

Розробка забезпечує вирішення екологічних проблем, пов'язаних із накопиченням відходів, і створює альтернативне джерело біопалива, що сприяє сталому розвитку спиртової промисловості.

Література

1. Бухкало С., Ольховська О., Ольховська В., Зіпуніков М. Дослідження та аналіз інноваційних заходів щодо комплексної технології переробки зернових відходів дистиляції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Інноваційні дослідження в студентських наукових роботах. 2019. № 15. С. 66–74. DOI: <https://doi.org/10.20998/2220-4784.2019.15.12>.
2. Потапова М. В., Голуб Н. Б. Сучасні методи переробки й утилізації зернової післяспиртової барди. *Innovative Biosystems & Bioengineering*. 2018. No. 2(2). С. 125–134. DOI: <https://doi.org/10.20535/ibb.2018.2.2.125733>.
3. Krzywonos M., Cibis E., Miśkiewicz T., Ryznar-Luty A. Utilization and biodegradation of starch stillage (distillery wastewater). *Electronic Journal of Biotechnology*. 2009. Vol. 12(1). DOI: <https://doi.org/10.2225/vol12-issue1-fulltext-5>.
4. Ольшаківський І. М., Михайлов І. М., Іванчук В. І. Інноваційна технологія комплексної переробки зернової післяспиртової барди. Київ : НУХТ, 2022. 85 с.
5. Босюк А., Шкоп А., Пономарьова Н., Шестопапов О., Матісс Д. Очищення бурових розчинів з використанням осаджувальних центрифуг. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2025. № 349(2). С. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-9>.
6. Єгоров Б., Кананихіна О., Турпунова Т. Технологія виробництва білково-вітамінної добавки біотехнологічним методом. 2019. № 82(2). С. 4–9. DOI: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i2.1168>.
7. Малицький Я. С., Брошак І. С., Ориник Б. І., Бровко О. З., Михайчук М. А. Використання барди як органічного добрива. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2022. № 4(100). DOI: <https://doi.org/10.31713/vs4202212>.
8. Казаков Д. Д., Рожевський Ю. П. Розробка технологічного процесу переробки післяспиртової барди для використання її в харчовій промисловості. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2017. № 10. С. 113–116. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vsna_mekh_2017_10_27.
9. Булій Ю. В., Мукоїд Р. М., Ольшаківський І. М., Михайлов І. М., Іванчук В. Г., Іванчук В. В. Інноваційна технологія комплексної переробки зернової післяспиртової барди. Київ, 2022.
10. Malvandi A., Nicole Coleman D., Loo J. J., Feng H. A novel sub-pilot-scale direct-contact ultrasonic dehydration technology for sustainable production of distillers dried grains (DDG). *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. Vol. 85. P. 105982. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105982>.
11. Iram A., Cekmecelioglu D., Demirci A. Distillers' dried grains with solubles (DDGS) and its potential as fermentation feedstock. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2020. Vol. 104(14). P. 6115–6128. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10682-0>.
12. Pesta A. C., Nuttelman B. L., Shreck A. L., Griffin W. A., Klopfenstein T. J., Erickson G. E. Finishing performance of feedlot cattle fed condensed distillers solubles.

Journal of Animal Science. 2015. Vol. 93(9). P. 4350–4357. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9247>.

13. Клименко В. В., Кравченко В. І., Боков В. М., Гуцул В. І. Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та їх композитів : монографія / за ред. В. В. Клименка. Кропивницький : ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. 162 с.

14. Калетник Г., Пришляк Н. Розвиток біопаливної промисловості як детермінанта сталого розвитку України. Економіка АПК. 2021. № 316(2). С. 71–81. DOI: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202102071>.

15. Бурлака С. А., Гуменюк Ю. В., Галушак О. О. Потенціал використання соломи зернових культур як біопалива. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2020. № 153(6). С. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-153-6-57-64>.

16. Гончарук І. В., Ємчик Т. В., Купчук І. М., Телекало Н. В., Гонтарук Я. В. Напрями удосконалення вирощування та переробки кукурудзи для біопалива. Таврійський науковий вісник. 2022. № 125. С. 25–32. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.125.4>.

17. Економічна доцільність виробництва твердого біопалива з енергетичних культур в Україні : кол. монографія / [Кизим М. О., Хаустова В. Є., Костенко Д. М., Котляров Є. І., Салашенко Т. І., Губарева І. О.]. Харків : ФОП Лібуркіна Л. М., 2023. 242 с.

18. Масикевич А. Ю., Яремчук В. М., Бать Р. Я., Масикевич Ю. Г., Малований М. С., Атаманюк В. М. Утилізація деревних відходів шляхом виготовлення паливних гранул методом екструзії. Науковий вісник НЛТУ України. 2019. № 29(1). С. 93–97. DOI: <https://doi.org/10.15421/40290120>.

19. Екологічно дружні технологічні рішення для місцевих громад щодо поводження з відходами : збірка матеріалів Національного форуму «Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології» (м. Київ, 23–24 листопада 2021 р.). Київ : Центр екологічної освіти та інформації, 2021. 275 с.

20. Альтернативні технологічні рішення проблеми повної утилізації мулового осаду стічних вод / [кол. авт.]. *Комунальне господарство міст. Серія «Економічні науки»*. 2018. № 144. С. 32–42. <https://khges.kname.edu.ua/index.php/khges/article/view/5250>.

21. Shkop A., Shestopalov O., Ponomarova N. та ін. Method design for distillers solubles recycling and reusing into fuel pellets. *Petroleum and Coal*. 2025. Vol. 67(1). P. 508–522.

Bibliography (transliterated)

1. Bukhkalov S., Olkhovska O., Olkhovska V., Zipunikov M. Doslidzhennia ta analiz innovatsiinykh zakhodiv shchodo kompleksnoi tekhnolohii pererobky zernovykh vidkhodiv dystyliatsii. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii: Innovatsiini doslidzhennia v studentskykh naukovykh robotakh. 2019. No. 15. P. 66–74. DOI: <https://doi.org/10.20998/2220-4784.2019.15.12>.

2. Potapova M. V., Holub N. B. Suchasni metody pererobky y utylizatsii zernovoi pisliaspyrtovoi bardy. *Innovative Biosystems & Bioengineering*. 2018. No. 2(2). P. 125–134. DOI: <https://doi.org/10.20535/ibb.2018.2.2.125733>.

3. Krzywonos M., Cibis E., Miśkiewicz T., Ryznar-Luty A. Utilization and biodegradation of starch stillage (distillery wastewater). *Electronic Journal of Biotechnology*. 2009. Vol. 12(1). DOI: <https://doi.org/10.2225/vol12-issue1-fulltext-5>.

4. Olshakovskiy I. M., Mykhailov I. M., Ivanchuk V. I. Innovatsiina tekhnolohiia kompleksnoi pererobky zernovoi pisliaspyrtovoi bardy. Kyiv : NUKhT, 2022. 85 p.
5. Bosiuk A., Shkop A., Ponomarova N., Shestopalov O., Matiss D. Ochyshchennia burovykh rozchyniv z vykorystanniam osadzhuvalnykh tsentryfuh. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. 2025. No. 349(2). P. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-9>.
6. Iehorov B., Kananykhina O., Turpurova T. Tekhnolohiia vyrobnytstva bilkovo-vitaminnoi dobavky biotekhnolohichnym metodom. 2019. No. 82(2). P. 4–9. DOI: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i2.1168>.
7. Malyskyi Ya. S., Broshchak I. S., Orynyk B. I., Brovko O. Z., Mykhaichuk M. A. Vykorystannia bardy yak orhanichnoho dobryva. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia*. 2022. No. 4(100). DOI: <https://doi.org/10.31713/vs4202212>.
8. Kazakov D. D., Rozhevskiy Yu. P. Rozrobka tekhnolohichnoho protsesu pererobky pisliaspyrtovoi bardy dlia vykorystannia yii v kharchovii promyslovosti. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu*. 2017. No. 10. P. 113–116. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vsna_mekh_2017_10_27.
9. Bulii Yu. V., Mukoid R. M., Olshakovskiy I. M., Mykhailov I. M., Ivanchuk V. H., Ivanchuk V. V. Innovatsiina tekhnolohiia kompleksnoi pererobky zernovoi pisliaspyrtovoi bardy. Kyiv, 2022.
10. Malvandi A., Nicole Coleman D., Loor J. J., Feng H. A novel sub-pilot-scale direct-contact ultrasonic dehydration technology for sustainable production of distillers dried grains (DDG). *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. Vol. 85. P. 105982. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105982>.
11. Iram A., Cekmecelioglu D., Demirci A. Distillers dried grains with solubles (DDGS) and its potential as fermentation feedstock. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2020. Vol. 104(14). P. 6115–6128. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10682-0>.
12. Pesta A. C., Nuttelman B. L., Shreck A. L., Griffin W. A., Klopfenstein T. J., Erickson G. E. Finishing performance of feedlot cattle fed condensed distillers solubles. *Journal of Animal Science*. 2015. Vol. 93(9). P. 4350–4357. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9247>.
13. Klymenko V. V., Kravchenko V. I., Bokov V. M., Hutsul V. I. Tekhnolohichni osnovy vyhotovlennia biopalyva z roslынnykh vidkhodiv ta yikh kompozytiv : monohrafiia / za red. V. V. Klymenka. Kropyvnytskyi : PP «Ekskluzyv-System», 2017. 162 p.
14. Kaletnyk H., Pryshliak N. Rozvytok biopalyvnoi promyslovosti yak determinanta staloho rozvytku Ukrainy. *Ekonomika APK*. 2021. No. 316(2). P. 71–81. DOI: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202102071>.
15. Burlaka S. A., Humeniuk Yu. V., Halushchak O. O. Potentsial vykorystannia solomy zernovykh kultur yak biopalyva. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. 2020. No. 153(6). P. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-153-6-57-64>.
16. Honcharuk I. V., Yemchuk T. V., Kupchuk I. M., Telekalo N. V., Hontaruk Ya. V. Napriamy udoskonalennia vyroshchuvannia ta pererobky kukurudzy dlia biopalyva. *Tavriiskiyi naukoviyi visnyk*. 2022. No. 125. P. 25–32. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.125.4>.
17. Ekonomichna dotsilnist vyrobnytstva tverdoho biopalyva z enerhetychnykh kultur v Ukraini : kol. monohrafiia / [Kyzym M. O., Khaustova V. Ye., Kostenko D. M., Kotliarov Ye. I., Salashenko T. I., Hubarieva I. O.]. Kharkiv : FOP Liburkina L. M., 2023. 242 p.

18. Masykevych A. Yu., Yaremchuk V. M., Bat R. Ya., Masykevych Yu. H., Malovanyi M. S., Atamaniuk V. M. Utylizatsiia derevnykh vidkhodiv shliakhom vyhotovlennia palyvnykh hranul metodom ekstruzii. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*. 2019. No. 29(1). P. 93–97. DOI: <https://doi.org/10.15421/40290120>.

19. Ekolohichno druzhni tekhnolohichni rishennia dlia mistsevykh hromad shchodo povodzhennia z vidkhodamy : zbirka materialiv Natsionalnoho forumu «Povodzhennia z vidkhodamy v Ukraini: zakonodavstvo, ekonomika, tekhnolohii» (m. Kyiv, 23–24 lystopada 2021 r.). Kyiv : Tsentr ekolohichnoi osvity ta informatsii, 2021. 275 p.

20. Alternatyvni tekhnolohichni rishennia problemy povnoi utylyzatsii mulovoho osadu stichnykh vod / [kol. avt.]. *Komunalne hospodarstvo mist. Seriia «Ekonomichni nauky»*. 2018. No. 144. P. 32–42. <https://khges.kname.edu.ua/index.php/khges/article/view/5250>.

21. Shkop A., Shestopalov O., Ponomarova N. ta in. Method design for distillers solubles recycling and reusing into fuel pellets. *Petroleum and Coal*. 2025. Vol. 67(1). P. 508–522.

УДК 504.06:628.543:662.6

А. О. Шкоп, канд. техн. наук, докторант, Н. Г. Пономарьова, канд. техн. наук, доцент, О. В. Шестопалов, канд. техн. наук, доцент, А. С. Босюк, д-р філософії, старший викладач, Д. М. Войтенко аспірант, В. С. Бутко, асистент

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ ЗОВНІШНІХ БАРДОНАКОПИЧУВАЧІВ У ПАЛИВНІ ПЕЛЕТИ

У даній роботі представлено розробка інноваційна технологія переробки післяспиртової барди, накопиченої у зовнішніх бардонакопичувачах спиртових заводів, у паливні пелети, що можуть використовуватися як екологічно чисте біопаливо з високою теплотворною здатністю. Запропонована технологія передбачає комплексний підхід, що включає видобуток барди за допомогою земснаряду, її транспортування пульпопроводом, механічне зневоднення на центрифугах до вологості 70–75 %, термічну сушку в барабанній сушарці до вологості 10–12 % та грануляцію для отримання паливних пелет діаметром 3 мм. Експериментально визначено кінетику сушіння барди, яка складається з періодів постійної та падаючої швидкості, що дозволило оптимізувати тривалість процесу до 3,494 години для продуктивності 1000 кг/год сухої барди. Отримані пелети мають теплотворну здатність 17,9–19,9 МДж/кг та вологість 5 % після охолодження, що забезпечує їх придатність для використання в твердопаливних котлоагрегатах. У статті проаналізовано обсяги утилізації барди з накопичувача об'ємом 20 000 м³, що становить приблизно 2080 т сухої барди за 7–8 місяців переробки при продуктивності 9–10 т/добу. Для забезпечення процесу рекомендовано використання пелетного теплогенератора потужністю 2 МВт, що дозволяє знизити енерговитрати завдяки оптимізації подачі сировини та повітря. Проведено розрахунки енергетичних витрат на сушку, які показали, що теплова потужність, генерована спалюванням пелет із лузги соняшнику (0,844 МВт), перевищує необхідну для сушіння барди (0,566 МВт), що підтверджує економічну доцільність технології. Запропонований підхід дозволяє не лише вирішити екологічні проблеми, пов'язані з накопиченням відходів спиртової промисловості, а й створити альтернативне джерело біопалива, яке може бути використано для забезпечення

енергетичних потреб спиртових заводів та інших промислових об'єктів. У статті наведено результати експериментальних досліджень, проведених на барді Артемівського спиртового заводу, а також технологічні розрахунки для барабанної сушарки діаметром 1500 мм і довжиною 9000 мм, що підтверджують можливість масштабування процесу. Перспективи подальших досліджень включають оптимізацію енерговитрат, удосконалення методів очищення барди від домішок і розробку автоматизованих систем контролю процесу переробки.

Ключові слова: післяспиртова барда, паливні пелети, бардонакопичувачі, утилізація відходів, механічне зневоднення, термічна сушка, грануляція, біопаливо, центрифугування.

A. O. Shkor, N. G. Ponomarova, O. V. Shestopalov, A. S. Bosiuk, D. M. Voitenko,
V. S. Butko

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR PROCESSING POST-ALCOHOL STILLAGE FROM EXTERNAL STILLAGE STORAGE FACILITIES INTO FUEL PELLETS

This paper presents the development of an innovative technology for processing post-distillation stills accumulated in external stills storage tanks of distilleries into fuel pellets that can be used as an environmentally friendly biofuel with high calorific value. The proposed technology involves a comprehensive approach that includes the extraction of bard using a dredger, its transportation by a pulp pipeline, mechanical dehydration in centrifuges to a moisture content of 70–75 %, thermal drying in a drum dryer to a moisture content of 10–12 %, and granulation to obtain fuel pellets with a diameter of 3 mm. The drying kinetics of the bard were experimentally determined, which consists of periods of constant and falling speed, which allowed optimizing the process duration to 3.494 hours for a productivity of 1000 kg/h of dry bard. The obtained pellets have a calorific value of 17.9–19.9 MJ/kg and a moisture content of 5 % after cooling, which ensures their suitability for use in solid fuel boilers. The article analyzes the volume of waste wood recycling from a storage tank with a volume of 20,000 m³, which is approximately 2080 tons of dry waste wood for 7–8 months of processing at a productivity of 9–10 tons/day. To ensure the process, it is recommended to use a pellet heat generator with a capacity of 2 MW, which allows reducing energy consumption by optimizing the supply of raw materials and air. Calculations of energy costs for drying were carried out, which showed that the thermal power generated by burning sunflower husk pellets (0.844 MW) exceeds that required for drying the husk (0.566 MW), which confirms the economic feasibility of the technology. The proposed approach allows not only to solve environmental problems associated with the accumulation of alcohol industry waste, but also to create an alternative source of biofuel that can be used to meet the energy needs of alcohol plants and other industrial facilities. The article presents the results of experimental studies conducted at the Artemivsk distillery, as well as technological calculations for a drum dryer with a diameter of 1500 mm and a length of 9000 mm, which confirm the possibility of scaling the process. Prospects for further research include optimizing energy consumption, improving methods for cleaning the wort from impurities, and developing automated systems for controlling the processing process.

Keywords: post-alcohol stillage, fuel pellets, stillage accumulators, waste disposal, mechanical dehydration, thermal drying, granulation, biofuel, centrifugation.