

О. В. Березюк, д-р техн. наук, доц.; М. О. Паламарчук

ЗАЛЕЖНІСТЬ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СПАЛЮВАННЯ БІОМАСИ ІЗ УТИЛІЗАЦІЄЮ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ВІД ЇЇ ВОЛОГОСТІ

Утилізація біомаси шляхом її спалювання надає можливість економити на традиційних енергоресурсах, що є загальною тенденцією переходу промисловості до використання альтернативних, відновлюваних джерел енергії та підвищення енергоефективності виробництва в цілому. Тому визначення регресійних залежностей витрат палива під час спалювання біомаси без та з утилізацією відхідних газів, а також її енергоефективності від вологості біомаси, які можуть бути використані під час розробки методики інженерних розрахунків параметрів обладнання для енергоефективного спалювання біомаси, є актуальною науково-технічною задачею. Метою дослідження є побудова за допомогою регресійного аналізу регресійних залежностей витрат палива при спалюванні біомаси без та з утилізацією відхідних газів, а також її енергоефективності від вологості біомаси, які можуть бути використані під час розробки методики інженерних розрахунків параметрів обладнання для енергоефективного спалювання біомаси. Під час проведення дослідження використано метод регресійного аналізу результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором найбільш адекватного виду функції із шістнадцяти найпоширеніших варіантів за критерієм максимального значення коефіцієнта кореляції. Регресія проводилась на основі лінеаризувальних перетворень, які дозволяють звести нелінійну залежність до лінійної. Визначення коефіцієнтів рівнянь регресії здійснювалась методом найменших квадратів за допомогою розробленої комп'ютерної програми "RegAnaliz". Отримано регресійні залежності витрат палива під час спалювання біомаси без та з утилізацією відхідних газів від її вологості, які можуть бути використані під час розробки методики інженерних розрахунків параметрів обладнання для енергоефективного спалювання біомаси. Побудовано графічну інтерпретацію витрат палива під час спалювання біомаси без та з утилізацією відхідних газів від її вологості, яка дозволяє наочно проілюструвати ці залежності та показати достатню збіжність теоретичних результатів з фактичними. Встановлено, що витрати палива при спалюванні біомаси як без утилізації відхідних газів, так і з утилізацією відхідних газів за збільшення її вологості зростають за гіперболічними залежностями, а збільшення енергоефективності за рахунок утилізації відхідних газів при спалюванні біомаси складає від 6,4 % до 44,9 % в залежності від її вологості. Отримано залежність, яка характеризує енергоефективність за рахунок утилізації відхідних газів при спалюванні біомаси від її вологості і може бути використана під час розробки методики інженерних розрахунків параметрів обладнання для енергоефективного спалювання біомаси.

Ключові слова: біомаса, спалювання, утилізація відхідних газів, енергоефективність, вологість, математичне моделювання, регресійний аналіз, регресійна залежність.

Вступ

Біомаса є одним з альтернативних енергетичних ресурсів, використання якої може суттєво допомогти у вирішенні проблеми нестачі первинних енергоносіїв в Україні [1]. Донедавна значна частина стеблових рослинних відходів аграрного виробництва, лісопильної та деревообробної промисловості з багатьох причин не знаходять подальшого технологічного застосування [2]. Однак в умовах постійного зростання цін на енергоресурси та підвищеного попиту на екологічно чисті відновлювані джерела енергії, проведення утилізації біомаси шляхом виготовлення з них різних видів твердого палива надає можливість економити на традиційних енергоресурсах, що є загальною тенденцією переходу промисловості до використання альтернативних, відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності виробництва в цілому [3]. У багатьох країнах біомасу використовують для отримання енергії, оскільки теплова віддача палива, яке отримане з таких відходів рослинного походження, цілком відповідає традиційному паливу. Одна тонна вугілля може

бути замінена $4,2 \text{ м}^3$ біомаси.

Постановка проблеми

Основні положення закону України "Про альтернативні джерела енергії" [4] визначають правові, економічні, екологічні та організаційні засади використання альтернативних джерел енергії та сприяння розширенню їх використання у паливно-енергетичному комплексі, зокрема зазначають, що енергія біомаси є одним із різновидів альтернативних джерел енергії. В Україні потенціал біомаси дозволяє щорічно одержувати при їхньому використанні енергетичний ефект, еквівалентний спалюванню більше ніж 1,5 млн. тонн вугілля. Проте використання деяких матеріалів у якості джерела енергії неможливе у їхньому первинному стані. Тому ці матеріали потрібно переробити шляхом зневоднення щоб вони були придатні до використання у якості палива. Висока вологість біомаси може призвести до зайвих енергозатрат під час їхнього спалювання у котельнях [2]. Тому визначення залежностей витрат палива при спалюванні біомаси без та з утилізацією відхідних газів, а також її енергоефективності від вологості біомаси є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В таких розвинутих країнах, як Данія та Нідерланди поширеність спалювання відходів складає 54,3 % і 36,6 %, відповідно [5]. Лише протягом 1995 – 2014 рр. поширеність спалювання твердих побутових відходів (ТПВ) у ЄС збільшилася майже удвічі, зростаючи найбільш інтенсивно серед інших методів поводження за гіперболічною залежністю [6].

Нижча теплота згорання ТПВ становить 6,285...8,38 МДж/кг, а за умови зменшення вологості ТПВ з 43 % до 20 % нижча теплота згорання ТПВ становить 9,14 МДж/кг [7]. Розглянуто можливість утилізації ТПВ на наявних комунальних ТЕЦ з генеруючою потужністю 12 МВт, що можуть працювати на енергетичному паливі (суміші ТПВ, зневоднених до 20 % відносної вологості та кам'яного вугілля з масовою часткою 16 %) із розрахунковою нижчою теплотою згорання 10,99 МДж/кг.

У матеріалах наукової роботи [8] визначено, що вміст води і тиск ущільнення горючих компонентів ТПВ були двома ключовими параметрами для отримання якісних паливних брикетів, які мають теплотворну здатність не менше 20 МДж/кг, еквівалентну теплотворній здатності бурого вугілля, і можуть бути спалені разом із вугіллям на електростанціях. Дослідження проводились за кімнатної температури без використання в'язучого при тиску 69...138 МПа і відносній вологості ТПВ 6...20 %, і дозволили встановити, що вміст води не повинен перевищувати 15 % для отримання високоякісних брикетів з суміші паперу та інших горючих матеріалів у ТПВ.

В роботі [9] доведена неможливість самостійного горіння ТПВ за вологості, з якою вони потрапляють зі сміттєвозів до сміттєспалювального заводу, що вказує на необхідність їхнього зневоднення перед спалюванням, а також виявлено, що зменшення відносної вологості ТПВ на 25...40 % призводить до збільшення їхньої питомої теплоти згорання в 1,6...2,2 рази. В статті [10] за допомогою запропонованого вологоміра [11] проведено дослідження процесів зневоднення ТПВ шнековим пресом за допомогою планування експерименту другого порядку, яке дало змогу визначити адекватні квадратичні регресійні моделі показників зневоднення від основних параметрів впливу. Регресійні залежності, що описують динаміку поширеності методів (з отриманням енергії та без отримання енергії) спалювання ТПВ в Україні отримано в роботі [12].

Зниження відносної вологості цукрової тростини з 42 % до 10 % під час спалювання в печі з нерухомим шаром дозволяє скоротити тривалість спалювання в 3,4...6 разів [13].

У статті [14] запропоновано установку для брикетування відходів деревообробної промисловості, що дозволяє підвищити їхню питому теплотворність за використання як твердого палива.

Опубліковані результати проведеного дослідження [15] показали, що перспективним методом утилізації деревних відходів є їхнє пресування у паливні брикети із використанням як зв'язуючої речовини натурального походження сульфатного мила – відходу який утворюється в процесі виварювання лізину із деревної маси в целюлозно-паперовому виробництві. Це дозволяє мінімізувати екологічну небезпеку від забруднення довкілля деревними відходами та відходами целюлозно-паперового виробництва, а також отримати якісне біопаливо. Використання зв'язуючої речовини дозволило знизити потужність двигуна на 40 %, а також збільшити густину отриманих паливних брикетів на 10 %.

У статті [1] розглянуто технологічні режими виготовлення паливного брикету з ряду техногенних відходів, які за своїм агрегатним фізичним станом непридатні для безпосереднього використання в технологічних процесах і апаратах. Застосування розглянутої технології на практиці здатне повернути відходи промисловості у вигляді паливних брикетів. Такі брикети можна використовувати для всіх видів топок, в котлах будь-якої потужності – від опалення приватних будинків до великої ТЕЦ. Відзначено, що включення в енергообіг альтернативних джерел енергії може стати вагомим внеском у розв'язання проблеми дефіциту первинних енергоносіїв, поліпшивши при цьому екологічну обстановку країни.

У науковій роботі [16] обґрунтовано, що використання вживаної деревини (ВЖД) є альтернативним додатковим ресурсом сировини за умови утилізації та перероблення її на вироби з деревини: заготовки криволінійної форми, меблевий щит, столярну та стружкову плиту, а також паливні гранули та паливні брикети. Розроблено методику розрахунку потенціалу ВЖД та його балансу за категоріями. Розраховано потенціал деревної біомаси – відходів деревини та ВЖД в Україні, який склав у 2012 р. 6,438 млн. т, зокрема ВЖД – 2,0 млн. т. На основі кластерного аналізу здійснено моніторинг ВЖД за обласними центрами України. Визначено основні фізико-механічні властивості отриманої продукції за розробленими технологіями. На основі одержаних математичних моделей встановлено закономірності впливу використання ВЖД на фізико-механічні показники одержаної продукції. Запропоновано режимні параметри для впровадження отриманих результатів досліджень у виробництво.

Авторами статті [17] наведені результати дослідження процесу пресування біомаси з метою отримання паливних гранул, брикетів, зокрема визначено вплив тиску і температури пресування на щільність отриманого продукту. Результати проведених досліджень показали, що підвищення температури пресування вище 90 – 100 °C і тиску вище 120 - 140 МПа є недоцільним, оскільки мало впливає на збільшення щільності біопалива та призводить до збільшення енерговитрат на його виготовлення. Отримані результати можуть використовуватися для визначення оптимальних конструкційно-технологічних параметрів процесу пресування дисперсних матеріалів для формування паливних брикетів.

У монографії [18] узагальнено результати розробки та систематизації технологічних основ виготовлення твердого біопалива з рослинних відходів та композитів на їх основі. Наведено методику оцінки пружних коефіцієнтів двохкомпонентного композитного біопалива на основі рослинних відходів. Визначено вплив конструктивних параметрів філь'єри матриці на якісні показники виготовленого біопалива та енергетичні характеристики пресового обладнання. Запропоновано та експериментально досліджено технологічні рішення виготовлення пелет поліпшеної якості з опалого листя, композитного палива на основі рослинних відходів і бурого вугілля, рослинних відходів і побутових відходів ПЕТФ.

Авторами наукової статті [19] отримано регресійні залежності тиску пресування відходів деревини у паливні брикети від коефіцієнта ущільнення як у вигляді поліномів шостого порядку, так і за допомогою степеневі функції. При цьому встановлено, що степенева функція забезпечує кращу достовірність апроксимації з меншою кількістю коефіцієнтів регресії. Визначено умови утворення паливних брикетів достатньої міцності для

транспортування та спалювання в енергетичних установках. Досліджено вплив щільності матеріалу тирси на тиск пресування.

За свідченнями дослідження, проведеними в роботі [20], на щільність паливних брикетів впливає в основному тиск пресування, що створюється в робочій камері преса чи формувальній головці, повинен створити зусилля рівне або більше зусиллю виштовхування брикету із формувальної головки. Останнє в основному залежить від форми та довжини робочого каналу, сил тертя, що визначаються зусиллями бокового тиску брикетів на стінки робочих каналів пресу. Із зміною осевого тиску в камері пресування буде змінюватися і боковий тиск, на величину та динаміку зміни якого значний вплив мають фізико-механічні властивості матеріалу.

В роботі [21] виконано моделювання теплоти, утилізованої з димових газів в циклоні типу ЦН-15-900 після парогенератора на біомасі у CFD-пакеті SolidWorks Flow Simulation. Отримано залежність теплового потоку у вбудованому теплообміннику-утилізаторі від швидкості та температури димових газів на вході у циклон.

Однак конкретних математичних залежностей витрат палива при спалюванні біомаси без та з утилізацією відхідних газів, а також її енергоефективності від вологості біомаси, авторами не виявлено.

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є визначення регресійних залежностей витрат палива під час спалювання біомаси без та з утилізацією відхідних газів, а також її енергоефективності від вологості біомаси, які можуть бути використані під час розробки методики інженерних розрахунків параметрів обладнання для енергоефективного спалювання біомаси.

Методи і матеріали

Під час визначення регресійних залежностей витрат палива при спалюванні біомаси без та з утилізацією відхідних газів від її вологості використано такі методи: регресійний аналіз результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей, комп'ютерне моделювання.

Результати досліджень

У таблиці 1 показані значення витрат палива для різної вологості палива – біомаси на прикладі дерев'яної тріски як без утилізації відхідних газів (без використання економайзера), так і з утилізацією відхідних газів (з використанням економайзера) для котельні з номінальною потужністю 5 МВт [22].

Регресії проводилась на основі лінеаризувальних перетворень, що дозволяють звести нелінійну залежність до лінійної. Визначення коефіцієнтів рівнянь регресії здійснювалась методом найменших квадратів [23] за допомогою розробленої комп'ютерної програми "RegAnaliz", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір [24] і детально описана в роботах [25, 26].

Програма "RegAnaliz" дозволяє проводити регресійний аналіз результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором кращого виду функції із шістнадцяти найпоширеніших варіантів за критерієм максимального коефіцієнту кореляції зі збереженням результатів в форматі MS Excel та Bitmap.

Результати регресійного аналізу наведені в таблиці 2, де сірим кольором позначено комірки з видом регресії з максимальним значенням коефіцієнта кореляції R.

Отже, за результатами регресійного аналізу на основі даних таблиці 1, як найбільш адекватні, остаточно прийнято такі регресійні залежності:

$$B_{\text{бутаг}} = \frac{1}{9,555 \cdot 10^{-4} - 1,156 \cdot 10^{-5} w} \text{ [кг/год];} \quad (1)$$

$$B_{зутвг} = \frac{1}{1,008 \cdot 10^{-3} - 1,065 \cdot 10^{-5} w} \text{ [кг/год]}, \quad (2)$$

де $B_{бвтвг}$ – витрата палива без утилізації відхідних газів, кг/год; $B_{зутвг}$ – витрата палива з утилізацією відхідних газів, кг/год; w – вологість палива, %.

Таблиця 1

Значення витрат палива для різної вологості палива – біомаси на прикладі дерев'яної тріски [22]

Вологість палива, %	Витрата палива без утилізації відхідних газів, кг/год	Витрата палива з утилізацією відхідних газів, кг/год
10	1177,6	1106,9
15	1271,9	1177,7
20	1380,3	1258,8
25	1506,2	1352,6
30	1654,3	1455,7
35	1830,6	1574,3
40	2053,6	1725,0
45	2329,4	1886,8
50	2678,9	2089,6
55	3135,6	2351,7
60	3756,3	2704,6
65	4647,7	3206,9

Таблиця 2

Результати регресійного аналізу залежностей витрат палива під час спалювання біомаси без та з утилізацією відхідних газів від її вологості

№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R		№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R	
		$B_{бвтвг} = f(w)$	$B_{зутвг} = f(w)$			$B_{бвтвг} = f(w)$	$B_{зутвг} = f(w)$
1	$y = a + bx$	0,93984	0,95477	9	$y = ax^b$	0,92142	0,92552
2	$y = 1 / (a + bx)$	0,99960	0,99993	10	$y = a + b \cdot \lg x$	0,83994	0,86366
3	$y = a + b / x$	0,69533	0,72443	11	$y = a + b \cdot \ln x$	0,83994	0,86366
4	$y = x / (a + bx)$	0,49503	0,78628	12	$y = a / (b + x)$	0,99959	0,99992
5	$y = ab^x$	0,98748	0,98871	13	$y = ax / (b + x)$	0,88160	0,87182
6	$y = ae^{bx}$	0,98748	0,98871	14	$y = ae^{b/x}$	0,79763	0,80424
7	$y = a \cdot 10^{bx}$	0,98748	0,98871	15	$y = a \cdot 10^{b/x}$	0,79763	0,80424
8	$y = 1 / (a + be^{-x})$	0,49715	0,48625	16	$y = a + bx^n$	0,98566	0,99170

На рис. 1 показані фактичні та теоретичні графічні залежності витрат палива під час спалювання біомаси без та з утилізацією відхідних газів від її вологості.

Порівняння фактичних та теоретичних даних показало, що теоретичні витрат палива під час спалювання біомаси без та з утилізацією відхідних газів залежно від її вологості, розраховані за допомогою рівнянь регресії (1), (2) несуттєво відрізняються від даних, наведених в роботі [22], що підтверджує визначену раніше точність отриманих залежностей на рівні 0,99960 та 0,99993, відповідно.

З рис. 1 видно, що витрати палива під час спалювання біомаси як без утилізації відхідних газів, так і з утилізацією відхідних газів за збільшення її вологості зростають за гіперболічними залежностями, а збільшення енергоефективності за рахунок утилізації відхідних газів при спалюванні біомаси складає від 6,4 % до 44,9 % в залежності від її вологості.

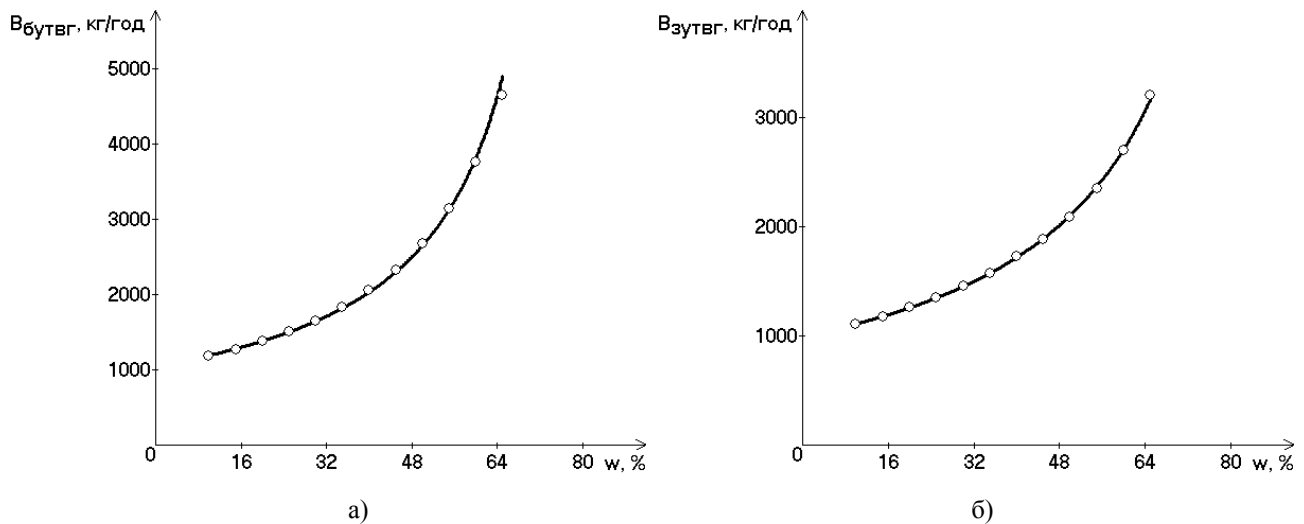


Рис. 1. Зміна витрати палива під час спалювання біомаси без утилізації відхідних газів (а) та з утилізацією відхідних газів (б) за збільшення її вологості

На основі отриманих залежностей (1), (2) можна отримати залежність, яка характеризує енергоефективність (економії палива) за рахунок утилізації відхідних газів під час спалювання біомаси від її вологості:

$$\Delta B = B_{\text{бугвг}} - B_{\text{зугвг}} = \frac{1}{9,555 \cdot 10^{-4} - 1,156 \cdot 10^{-5} w} - \frac{1}{1,008 \cdot 10^{-3} - 1,065 \cdot 10^{-5} w} =$$

$$= \frac{7392w + 426483}{w^2 - 177,3w + 7824} \text{ [кг/год]}. \quad (3)$$

Висновки

1. Визначено регресійні залежності витрат палива під час спалювання біомаси без та з утилізацією відхідних газів від її вологості, які можуть бути використані під час розробки методики інженерних розрахунків параметрів обладнання для енергоефективного спалювання біомаси.

2. Побудовано графічну інтерпретацію витрат палива під час спалювання біомаси без та з утилізацією відхідних газів від її вологості, яка дозволяє наочно проілюструвати ці залежності та показати збіжність теоретичних результатів з фактичними на рівні 0,99960 та 0,99993, відповідно.

3. Встановлено, що витрати палива під час спалювання біомаси як без утилізації відхідних газів, так і з утилізацією відхідних газів за збільшення її вологості зростають за гіперболічними залежностями, а збільшення енергоефективності за рахунок утилізації відхідних газів при спалюванні біомаси складає від 6,4 % до 44,9 % в залежності від її вологості.

4. Отримано залежність, яка характеризує енергоефективність за рахунок утилізації відхідних газів під час спалювання біомаси від її вологості і може бути використана під час розробки методики інженерних розрахунків параметрів обладнання для енергоефективного спалювання біомаси.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Корчевський О. М., Сурженко А. М., Садовой М. І. Визначення раціональних параметрів для отримання багатокомпонентних брикетів. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2014. № 2(35). С. 9–15.
2. Кузенко Д. В., Левко С. І. Методика та результати експериментальних досліджень коефіцієнта бокового тиску рослинних матеріалів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2014. № 4, Т. 2. С. 174–182.
3. Study of briquetting of woodworking waste with industrial press equipment / J. Vlasov et al. *International* Наукові праці ВНТУ, 2025, № 3

Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. 2019. № 19 (3.2). P. 829–834.

4. Верховна Рада України. Закон України № 555-IV "Про альтернативні джерела енергії" 20 лютого 2003. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> (дата звернення: 23.10.2024).

5. Орлова Т. А. Екологічна оцінка земельних ділянок, зайнятих об'єктами поводження з відходами. *Містобудування та територіальне планування: наук.-техн. збірник*. 2006. Вип. 25. С. 167–181.

6. Березюк О. В., Краєвський В. О., Березюк Л. Л. Динаміка поширеності методів поводження з твердими побутовими відходами в ЄС. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 1. С. 104–109.

7. Рижий В. К., Римар Т. І., Тимофеев І. Л. Утилізація твердих побутових відходів на наявних комунальних ТЕЦ. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2011. № 712 : Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. С. 17–22.

8. Li Y., Liu H., Zhang O. High-pressure compaction of municipal solid waste to form densified fuel. *Fuel Processing Technology*. 2001. Vol. 74, № 2. P. 81–91. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00218-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00218-1)

9. Дослідження кількості теплоти, що виділяється при спалюванні змішаних твердих побутових відходів м. Києва / О. І. Сігал та ін. *Промислова теплотехніка*. 2017. Т. 39, № 3. С. 78–84.

10. Березюк О. В. Експериментальне дослідження процесів зневоднення твердих побутових відходів шнековим пресом. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2018. № 5. С. 18–24. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2018-140-5-18-24>

11. Means for measuring relative humidity of municipal solid wastes based on the microcontroller Arduino UNO R3 / O. V. Bereziuk et al. *Proc. SPIE, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2018*. 2018. Vol. 10808. Art. no. 108083G. <https://doi.org/10.1117/12.2501557>.

12. Березюк О. В., Лемешев М. С. Динаміка поширеності методів спалювання твердих побутових відходів в Україні. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. № 1. С. 6–10. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-6-10>.

13. Sánchez C. Z., Gauthier-Maradei P., Escalante H. H. Effect of particle size and humidity on sugarcane bagasse combustion in a fixed bed furnace. *Revista ION*. 2013. Vol. 26, № 2. P. 73–85.

14. Березюк О. В. Установка із вібраційним гідроприводом для брикетування відходів деревообробної промисловості. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2007. № 4. С. 149–152.

15. Використання зв'язуючого натурального походження для удосконалення технології створення паливних брикетів із деревних відходів / М. С. Мальований та ін. *Водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг* : колективна монографія. Київ : Яроченко Я. В., 2023. С. 91–105.

16. Гайда С. В. Технології та рекомендації до використання вживаної деревини в деревообробленні. *Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть* : міжвід. наук.-техн. зб. 2013. Вип. 39.1. С. 48–67.

17. Костюнін М., Карманов В., Михайлик В. Дослідження процесу пресування дисперсних матеріалів з метою отримання паливних гранул, брикетів. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*. 2013. № 17(2). С. 341–345.

18. Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та їх композитів : монографія / В. В. Клименко та ін. Кропивницький : ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. 162 с.

19. Експериментальне визначення необхідних умов і параметрів процесу та приводу пресування паливних брикетів з відходів деревини / В. І. Савуляк та ін. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2010. № 5. С. 96–99.

20. Левко С. І. Огляд теорій процесу пресування. *Вісник Львів. НАУ «Агроінженерні дослідження»*. 2010. №15. С. 458–467.

21. Степанова Н. Д., Глеба Я. О., Паламарчук М. О. Утилізація теплоти димових газів після парогенератора на біомасі. *Інноваційні технології в будівництві-2024 : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції*, 20-22 листопада 2024, м. Вінниця. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2024/paper/view/22679/18720>.

22. Досвід реалізації інтенсифікації теплообміну в підігрівниках цукрових заводів / В. А. Мельник та ін. *Цукор України*. 2015. № 3 (111). С. 11–14.

23. Михалевич В. М., Шевчук О. І., Буга Н. Л. Математичні системи комп'ютерної алгебри як засіб підвищення ефективності і якості освітнього процесу з вищої математики. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми* : зб. наук. прац. Випуск 14. Київ-Вінниця : ДОВ «Вінниця», 2007. С. 357–360.

24. Березюк О. В. Комп'ютерна програма "Регресійний аналіз" ("RegAnaliz"). Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49486. Київ : Державна служба інтелектуальної власності України. Дата реєстрації: 03.06.2013.

25. Bereziuk O. V. Determination of the regression of the solid waste compaction factor on the height of the polygon on the base of the computer program "RegAnaliz". *Automation of technologies and productions*. 2015. № 2 (8). P. 43–45.

26. Березюк О. В. Встановлення регресій параметрів захоронення відходів та потреби в ущільнювальних машинах на основі комп'ютерної програми "RegAnaliz". *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2014. № 1. С. 40–45.

Стаття надійшла до редакції 19.05.2025.

Стаття пройшла рецензування 25.09.2025.

Березюк Олег Володимирович – д-р техн. наук, професор кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, e-mail: berezyukoleg@i.ua.

Паламарчук Микола Олександрович – аспірант кафедри теплоенергетики.
Вінницький національний технічний університет.