УДК 604.4:662.6:579; 628.474.33

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

ЗАЛЕЖНІСТЬ ЧАСУ ЗАТРИМКИ ЗАЙМАННЯ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ НАГРІВАННЯ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ ПРИ СПАЛЮВАННІ БІОМАСИ

Переробка біомаси шляхом її спалювання дозволяє скоротити споживання традиційних енергетичних ресурсів, що відповідає загальній тенденції розвитку промисловості у напрямі використання альтернативних відновлюваних джерел енергії та підвищення загальної енергоефективності виробничих процесів. Тому визначення регресійної залежності часу затримки займання від температури нагрівання повітряного потоку при спалюванні біомаси є актуальною науково-технічною задачею. Метою дослідження є побудова за допомогою регресійного аналізу регресійної залежності часу затримки займання від температури нагрівання повітряного потоку при спалюванні біомаси, яка може бути використана 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 регресійну залежність часу затримки займання від температури нагрівання повітряного потоку при спалюванні біомаси. Ця залежність може бути використана під час розробки методики інженерних розрахунків параметрів обладнання для енергоефективного спалювання біомаси. Побудовано графічну інтерпретацію залежності часу затримки займання від температури нагрівання повітряного потоку при спалюванні біомаси, яка дозволяє наочно проілюструвати цю залежність та показати достатню збіжність теоретичних результатів з фактичними. Встановлено, що час затримки займання під час спалювання біомаси за збільшення температури нагрівання повітряного потоку зменшується за експоненціальною залежністю.

Ключові слова: *біомаса, спалювання, час затримки займання, температура нагрівання, повітряний потік, математичне моделювання, регресійний аналіз, регресійна залежність.*

Вступ

Біомаса виступає одним із перспективних альтернативних енергетичних ресурсів, застосування якого здатне суттєво сприяти подоланню дефіциту первинних енергоносіїв в Україні [1]. До недавнього часу значна частина стеблових рослинних відходів аграрного сектору, а також відходів лісопильної та деревообробної галузей з різних причин не знаходила подальшого технологічного використання [2]. Водночас, в умовах постійного зростання вартості енергоресурсів і підвищеного попиту на екологічно безпечні відновлювані джерела енергії, переробка біомаси шляхом виробництва різних видів твердого палива дає змогу зменшити споживання традиційних енергоресурсів. Це відповідає загальносвітовій тенденції переходу промисловості до використання альтернативних відновлюваних джерел енергії [3] та сприяє підвищенню загальної енергоефективності виробництва [4]. У багатьох країнах біомасу широко застосовують для енергетичних потреб, оскільки теплота згоряння палива, отриманого з рослинних відходів, є співставною з показниками традиційних видів палива. Зокрема, одна тонна вугілля може бути еквівалентно замінена приблизно 4,2 м³ біомаси.

Постановка проблеми

Ключові положення Закону України «Про альтернативні джерела енергії» [5] встановлюють правові, економічні, екологічні та організаційні основи використання альтернативної енергетики, а також спрямовані на стимулювання її розвитку в паливно-енергетичному секторі. Зокрема, у законі підкреслюється, що енергія біомаси належить до видів альтернативних джерел енергії. Водночас наявний в Україні потенціал біомаси дає змогу щорічно отримувати енергетичний ефект, співмірний зі спалюванням понад 1,5 млн тонн вугілля. Високий вміст вологи в частинках біомаси збільшує час затримки її займання при спалюванні. Для інтенсифікації займання біомаси під час горіння використовують муфельний попередній підігрівач [6]. Тому визначення залежності часу затримки займання від температури нагрівання повітряного потоку при спалюванні біомаси є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Частка спалювання відходів у таких розвинених країнах, як Данія та Нідерланди, становить відповідно 54,3 % і 36,6 % [7]. Протягом періоду 1995 – 2014 рр. рівень спалювання твердих побутових відходів (ТПВ) у країнах ЄС майже подвоївся, демонструючи найвищі темпи зростання серед інших способів поводження з відходами та підпорядковуючись гіперболічній залежності [8].

Нижча теплота згоряння твердих побутових відходів становить 6,285 – 8,38 МДж/кг, тоді як за зниження їхньої вологості з 43 % до 20 % цей показник зростає до 9,14 МДж/кг [9]. Також проаналізовано можливість використання ТПВ на діючих комунальних теплоелектроцентралях потужністю 12 МВт, які здатні працювати на енергетичному паливі у вигляді суміші відходів (з попереднім зневодненням до 20 % вологості) та кам’яного вугілля з масовою часткою 16 %. Для такої паливної суміші розрахункова нижча теплота згоряння становить 10,99 МДж/кг.

У науковій праці [10] встановлено, що визначальними чинниками отримання високоякісних паливних брикетів із горючих компонентів ТПВ є вологість матеріалу та тиск пресування. Зазначено, що такі брикети можуть мати теплотворну здатність не нижче 20 МДж/кг, що відповідає показникам бурого вугілля, і придатні для спільного спалювання з вугіллям на електростанціях. Експериментальні дослідження проводилися за кімнатної температури без застосування в’яжучих речовин, у діапазоні тиску 69 – 138 МПа та за відносної вологості ТПВ 6 – 20 %. У результаті встановлено, що для отримання якісних паливних брикетів із суміші паперу та інших горючих складових ТПВ вміст вологи не повинен перевищувати 15 %.

У роботі [11] обґрунтовано, що ТПВ за їхньої початкової вологості, з якою вони надходять зі сміттєвозів на сміттєспалювальні підприємства, не здатні до самостійного горіння. Це підтверджує необхідність попереднього зневоднення перед процесом спалювання. Також встановлено, що зниження відносної вологості ТПВ на 25 – 40 % забезпечує підвищення їхньої питомої теплоти згоряння у 1,6 – 2,2 рази. У дослідженні [12] із застосуванням запропонованого вологоміра [13] проведено аналіз процесів зневоднення ТПВ у шнековому пресі, зокрема для підвищення їхньої теплотворної здатності, на основі планування експерименту другого порядку. Це дозволило отримати адекватні квадратичні регресійні моделі, що описують залежність показників зневоднення від основних факторів впливу. Крім того, у роботі [14] отримано регресійні залежності, які характеризують динаміку поширення різних методів спалювання ТПВ (як різновиду біомаси) в Україні – як із отриманням енергії, так і без нього.

Зменшення відносної вологості цукрової тростини з 42 % до 10 % під час її спалювання в печі з нерухомим шаром істотно впливає на ефективність процесу горіння. Як показують дослідження [15], така оптимізація вологості дозволяє значно скоротити час повного

спалювання біомаси – у середньому в 3,4 – 6 разів порівняно з процесом горіння сирої тростини. Це пояснюється тим, що низька вологість зменшує витрати тепла на випаровування води, прискорює підготовку горючих компонентів до активного згоряння та підвищує загальну інтенсивність тепловіддачі в печі.

Одним з найпоширеніших видів біомаси є деревина завдяки її доступності та відносно високій теплоті згоряння порівняно з енергетичним вугіллям [16].

У статті [17] наведено розробку спеціальної установки для брикетування відходів деревообробної промисловості. Використання цієї установки дає змогу ефективно переробляти деревні відходи у паливні брикети, що мають підвищену питому теплоємність. Завдяки цьому отримане тверде паливо стає більш енергетично цінним і придатним для спалювання в промислових та комунальних енергетичних установках. Крім того, застосування такого обладнання сприяє раціональному використанню деревної сировини, зменшенню обсягів відходів і підвищенню загальної енергоефективності виробничих процесів, оскільки більш щільні та енергетично насичені брикети забезпечують стабільніше й економніше горіння.

Опубліковані результати дослідження [18] засвідчили, що одним із ефективних напрямів утилізації деревних відходів є їхнє брикетування із застосуванням природної зв’язувальної речовини – сульфатного мила, яке утворюється як побічний продукт під час варіння лігніну в целюлозно-паперовій промисловості. Такий підхід сприяє зменшенню екологічного навантаження, пов’язаного з накопиченням деревних і целюлозно-паперових відходів, а також дає змогу отримувати якісне біопаливо. Використання зазначеної зв’язувальної добавки забезпечує зниження енергоспоживання (зокрема, потужності приводу) приблизно на 40 % і водночас підвищує щільність виготовлених паливних брикетів на 10 %.

У матеріалах статті [1] проаналізовано технологічні режими виробництва паливних брикетів із різних техногенних відходів, які через свій агрегатний стан не можуть безпосередньо використовуватися у технологічних процесах і обладнанні. Впровадження цієї технології на практиці дає змогу повторно залучати промислові відходи в енергетичний обіг у формі паливних брикетів. Отримане паливо є універсальним і може застосовуватися в топках різного типу та котлах будь-якої потужності – від систем опалення приватних будинків до великих теплоелектроцентралей. Наголошується, що інтеграція альтернативних джерел енергії в енергетичний баланс може суттєво сприяти подоланню дефіциту первинних енергоресурсів і водночас покращити екологічний стан країни.

У науковій праці [19] доведено, що вживана деревина (ВЖД) може розглядатися як додаткове альтернативне джерело сировини за умови її утилізації та подальшої переробки у різноманітну продукцію з деревини, зокрема заготовки криволінійної форми, меблеві щити, столярні та деревостружкові плити, а також паливні гранули й брикети. Запропоновано методичний підхід до оцінювання потенціалу ВЖД і формування його балансу за окремими категоріями. Визначено, що загальний потенціал деревної біомаси в Україні (включаючи відходи деревини та ВЖД) у 2012 році становив 6,438 млн. т, з яких близько 2,0 млн. т припадало на ВЖД. Із застосуванням кластерного аналізу проведено моніторинг розподілу ВЖД за обласними центрами країни. Також досліджено основні фізико-механічні властивості продукції, отриманої за розробленими технологіями, та на основі побудованих математичних моделей встановлено закономірності впливу використання ВЖД на ці показники. За результатами роботи запропоновано раціональні режимні параметри для впровадження відповідних технологічних рішень у виробництво.

У статті [20] наведені результати дослідження процесу пресування біомаси для отримання паливних гранул і брикетів, зокрема проаналізовано вплив тиску та температури пресування на щільність готового продукту. Дослідження показали, що підвищення температури понад 90 – 100 °C та тиску понад 120 – 140 МПа є неефективним, оскільки мало впливає на збільшення щільності біопалива, але значно підвищує енергетичні витрати на його виготовлення. Отримані дані можуть бути використані для визначення оптимальних

конструкційно-технологічних параметрів процесу пресування дисперсних матеріалів під час формування паливних брикетів.

У матеріалах монографії [21] узагальнено результати розробки та систематизації технологічних основ виробництва твердого біопалива з рослинних відходів та композитних матеріалів на їхній основі. Наведено методику оцінки пружних коефіцієнтів двокомпонентного композитного біопалива, виготовленого з рослинних відходів. Досліджено вплив конструктивних параметрів фільєри матриці на якість отриманого біопалива та енергетичні характеристики пресового обладнання. Запропоновано та експериментально перевірено технологічні рішення щодо виробництва пелет підвищеної якості з опалого листя, композитного палива на основі рослинних відходів і бурого вугілля, а також сумішей рослинних відходів із побутовими відходами ПЕТФ.

У науковій статті [22] отримано регресійні залежності між тиском пресування деревних відходів у паливні брикети та коефіцієнтом ущільнення, представлені як поліноми шостого порядку та у вигляді степеневої функції. Встановлено, що степенева функція забезпечує більш точну апроксимацію за меншої кількості коефіцієнтів регресії. Досліджено умови формування паливних брикетів із достатньою міцністю для транспортування та спалювання в енергетичних установках, а також визначено вплив щільності тирси на величину тиску пресування.

За результатами досліджень, наведених у роботі [23], щільність паливних брикетів визначається насамперед тиском пресування, який створюється в робочій камері преса або формувальній головці. Цей тиск має бути рівним або перевищувати зусилля, необхідне для виштовхування брикету з формувальної головки. Значною мірою воно залежить від форми та довжини робочого каналу, а також від сил тертя, які визначаються боковим тиском брикетів на стінки каналу преса. За зміни осьового тиску в камері пресування змінюється й боковий тиск, причому величина та динаміка цієї зміни істотно залежать від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу.

У роботі [24] проведено моделювання процесу утилізації теплоти димових газів у циклонах типу ЦН-15-900 після парогенератора на біомасі з використанням CFD-пакета SolidWorks Flow Simulation. Встановлено залежність теплового потоку у вбудованому теплообміннику-утилізаторі від швидкості та температури димових газів на вході в циклон.

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 наведено в дослідженні [25]. В статті [26] визначено регресійні залежності витрат палива при спалюванні біомаси без та з утилізацією відхідних газів від її вологості, а також отримано залежність, яка характеризує енергоефективність за рахунок утилізації відхідних газів при спалюванні біомаси від її вологості.

В роботі [27] отримано адекватну регресійну залежність теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі від основних факторів впливу: температури та швидкості газів на вході парогенератора, а в матеріалах наукової статті [28] встановлено регресійну залежність ККД котла від вологості біомаси під час її спалювання.

Однак конкретних математичних залежностей часу затримки займання від температури нагрівання повітряного потоку при спалюванні біомаси, авторами не виявлено.

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є визначення регресійної залежності часу затримки займання від температури нагрівання повітряного потоку при спалюванні біомаси, яка може бути використана під час розробки методики інженерних розрахунків параметрів обладнання для енергоефективного спалювання біомаси.

Методи і матеріали

Під час визначення регресійної залежності часу затримки займання від температури нагрівання повітряного потоку при спалюванні біомаси використано такі методи: регресійний аналіз результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей, комп'ютерне моделювання.

Результати досліджень

У таблиці 1 показані значення часу затримки займання для різної температури нагрівання повітряного потоку при спалюванні біомаси [29]. Використання семи експериментальних точок при оцінюванні двох параметрів однофакторної регресійної моделі відповідає вимогам класичного методу найменших квадратів, згідно з якими число спостережень повинно перевищувати кількість оцінюваних параметрів. Отримані 5 ступенів вільності для однофакторної регресії вважається достатньою, оскільки забезпечує можливість виконання всіх основних статистичних процедур регресійного аналізу.

Таблиця 1

Значення часу затримки займання для різної температури нагрівання повітряного потоку при спалюванні біомаси [29]

Температура нагрівання повітряного потоку, °С	500	550	600	650	700	750	800
Час затримки займання, с	0,167	0,12	0,085	0,06	0,043	0,029	0,021

Регресія проводилась на основі лінеаризувальних перетворень, що дозволяють звести нелінійну залежність до лінійної. Визначення коефіцієнтів рівняння регресії здійснювалось методом найменших квадратів [30] за допомогою розробленої комп'ютерної програми "RegAnaliz", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір [31] і детально описана в роботах [32, 33].

Програма "RegAnaliz" дозволяє проводити регресійний аналіз результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором кращого виду функції із 16 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*.

Таблиця 2

Результати регресійного аналізу залежності часу затримки займання від температури нагрівання повітряного потоку при спалюванні біомаси

№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R	№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R
1	$y = a + bx$	0,96321	9	$y = ax^b$	0,99677
2	$y = 1 / (a + bx)$	0,95809	10	$y = a + b \cdot \lg x$	0,97914
3	$y = a + b / x$	0,99066	11	$y = a + b \cdot \ln x$	0,97914
4	$y = x / (a + bx)$	0,94538	12	$y = a / (b + x)$	0,95809
5	$y = ab^x$	0,99979	13	$y = ax / (b + x)$	0,91219
6	$y = ae^{bx}$ ($a = 5,492$; $b = -0,006959$)	0,99980	14	$y = ae^{b / x}$	0,98914
7	$y = a \cdot 10^{bx}$	0,99979	15	$y = a \cdot 10^{b / x}$	0,98914
8	$y = 1 / (a + be^{-x})$	0,99979	16	$y = a + bx^{n=2}$	0,94344

Отже, за результатами регресійного аналізу на основі даних таблиці 1, як найбільш адекватні, остаточно прийнято таку регресійну залежність

$$\tau = 5{,}492e^{-0{,}006959t} \text{ [с]}, \quad (1)$$

де τ – час затримки займання, с; t – температура нагрівання повітряного потоку, °С.

На рис. 1 показані фактичну та теоретичну графічні залежності часу затримки займання

від температури нагрівання повітряного потоку при спалюванні біомаси.

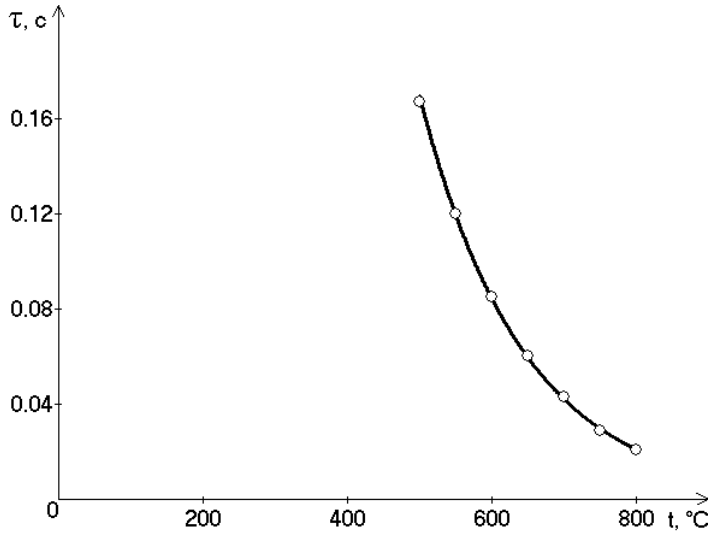


Рис. 1. Зміна часу затримки займання за збільшення температури нагрівання повітряного потоку при спалюванні біомаси: фактична ○, теоретична —

Порівняння фактичних та теоретичних даних показало, що теоретичний час затримки займання залежно від температури нагрівання повітряного потоку при спалюванні біомаси, розрахований за допомогою рівняння регресії (1) несуттєво відрізняються від даних, наведених в роботі [29], що підтверджує визначену раніше точність отриманої залежності на рівні коефіцієнта кореляції R = 0,99980, коефіцієнта детермінації R^2 = 0,99960, максимальної відносної похибки апроксимації δ_{max} = 1,38 %.

З рис. 1 видно, що час затримки займання під час спалювання біомаси при збільшенні температури нагрівання повітряного потоку зменшується за експоненціальною залежністю.

Вивчення впливу вологості біомаси на час затримки займання при спалюванні біомаси вимагає проведення подальших досліджень.

Висновки

1. Визначено регресійну залежність часу затримки займання від температури нагрівання повітряного потоку при спалюванні біомаси, яка може бути використана під час розробки методики інженерних розрахунків параметрів обладнання для енергоефективного спалювання біомаси.

2. Побудовано графічну інтерпретацію залежності часу затримки займання від температури нагрівання повітряного потоку при спалюванні біомаси, яка дозволяє наочно проілюструвати цю залежність та показати збіжність теоретичних результатів з фактичними на рівні коефіцієнта кореляції R = 0,99980, коефіцієнта детермінації R^2 = = 0,99960, максимальної відносної похибки апроксимації δ_{max} = 1,38%.

3. Встановлено, що час затримки займання під час спалювання біомаси за збільшення температури нагрівання повітряного потоку зменшується за експоненціальною залежністю.

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. Горбачов А. С., Піонткевич О. В. Аналіз конструктивних рішень для орієнтації сонячних панелей. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2025. № 3. URL: https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/868.

4. Study of briquetting of woodworking waste with industrial press equipment / J. Vlasov et al. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*. 2019. №19 (3.2). P. 829–834.

5. 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).

6. An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement / D. O. Glushkov et al. *Fuel Processing Technology*. 2021. № 223. Art. № 106986. URL: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106986.

7. 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.

8. 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.

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

10. 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. URL: https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00218-1.

11. 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.

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

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

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

15. 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.

16. Catalytic co-combustion of biomass and brown coal in a fluidized bed: Economic and environmental benefits / Y. V. Dubinin et al. *China Environmental Science*. 2024. № 140. P. 24–36. URL: https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.02.045

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

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

19. 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.

20. 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.

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

22. 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.

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

24. 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.

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

26. Березюк О. В., Паламарчук М. О. Залежність енергоефективності спалювання біомаси із утилізацією відхідних газів від її вологості. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2025. № 3. URL: https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/857/800.

27. Березюк О. В., Паламарчук М. О. Залежність теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі від основних факторів впливу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2025. № 5. С. 36–40. URL: https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-182-5-36-40.

28. Березюк О. В., Паламарчук М. О. Встановлення регресійної залежності ККД котла від вологості біомаси

під час її спалювання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2025. № 6. С. 53–59. URL: https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-183-6-53-59.

29. Experimental combustion of different biomass wastes, coals and two fuel mixtures on a fire bench / A. Zhuikov et al. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. № 12. Art. № 5227. URL: https://doi.org/10.3390/su16125227.

30. 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 іноваційні методики навчання у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми* : зб. наук. прац. Випуск 14. Київ-Вінниця : ДОВ «Вінниця», 2007. С. 357–360.

31. 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.

32. Березюк О. В. Визначення регресійних залежностей витрат на управління твердими побутовими відходами від рівня доходів населення. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2012. № 5. С. 24–26.

33. Березюк О. В. Регресійний аналіз концентрації нафтопродуктів в ґрунтах полігонів твердих побутових відходів. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2022. № 3. URL: https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/658/622 (дата звернення: 19.02.2026).

Стаття надійшла до редакції 23.03.2026.
Стаття пройшла рецензування 03.07.2026.
Стаття опублікована 30.09.2026.

Березюк Олег Володимирович – д-р техн. наук, професор кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, e-mail: berezyukoleg@i.ua, ORCID: 0000-0002-2747-2978.

Паламарчук Микола Олександрович – аспірант кафедри теплоенергетики, ORCID: 0009-0007-2106-5777.

Вінницький національний технічний університет.