

О. В. Березюк¹
М. О. Паламарчук¹

ВСТАНОВЛЕННЯ РЕГРЕСІЙНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ККД КОТЛА ВІД ВОЛОГОСТІ БІОМАСИ ПІД ЧАС ЇЇ СПАЛЮВАННЯ

¹Вінницький національний технічний університет

Утилізація біомаси спалюванням дає можливість зменшити споживання традиційних енергетичних ресурсів, що відповідає світовій тенденції до впровадження альтернативних та відновлюваних джерел енергії та підвищення загальної енергоефективності промислового виробництва. У цьому контексті визначення регресійної залежності коефіцієнта корисної дії котла від вологості біомаси є актуальною науково-технічною задачею, оскільки може слугувати основою для розробки інженерної методики розрахунку енергоефективних систем спалювання біомаси. Метою цього дослідження є встановлення за допомогою регресійного аналізу функціонального зв'язку між коефіцієнтом корисної дії котла та вологістю біомаси, який може бути додатково застосований для розробки інженерної методики проектування енергоефективного теплового обладнання. У дослідженні використовувався регресійний аналіз однофакторних експериментальних результатів та інших парних залежностей, при цьому найадекватніша функція вибрана з шістнадцяти поширених функціональних форм відповідно до критерію максимального коефіцієнта кореляції. Нелінійні залежності лінеаризовано за допомогою відповідних лінеаризувальних математичних перетворень. Коефіцієнти рівнянь регресії визначені за допомогою методу найменших квадратів, реалізованого в спеціально розробленій комп'ютерній програмі «RegAnaliz». В результаті отримано рівняння регресії, що описує залежність коефіцієнта корисної дії котла від вологості біомаси. Цей зв'язок можна використовувати для інженерних розрахунків параметрів обладнання для підвищення енергетичної ефективності спалювання біомаси. Також графічно інтерпретовано отриману залежність, яка забезпечує чітке візуальне представлення та демонструє прийнятну відповідність між теоретичними прогнозами та експериментальними даними. Встановлено, що коефіцієнт корисної дії котла знижується зі збільшенням вмісту вологи в біомасі відповідно до степеневого закону залежності.

Ключові слова: котел, коефіцієнт корисної дії, біомаса, спалювання, вологість, математичне моделювання, регресійний аналіз, регресійна залежність.

Вступ

Останніми роками набуло поширення переобладнання промислових парогенераторів на спалювання твердої біомаси [1]. Такий підхід відповідає сучасним екологічним вимогам, оскільки сприяє зменшенню викидів шкідливих речовин і є безпечнішим для довкілля порівняно з традиційними видами палива. За умови екологічно сталого виробництва біомаси її використання забезпечує часткову вуглецеву рівновагу: під час згоряння в атмосферу повертається кількість CO₂, яка поглинута рослинами в процесі росту. Попри відносну екологічність, спалювання біомаси не повністю усуває проблему промислових забруднень, оскільки супроводжується викидами оксидів азоту (NO_x), діоксинів, летких органічних сполук і твердих частинок. В котельнях в Україні як паливо застосовують різні види біомаси — деревину й тріску, солому, біопаливні гранули, біогаз, енергетичні культури, паливні брикети та лушпиння соняшнику. Найпоширенішою сировиною є деревна тріска, що використовується для отримання тепла у вигляді гарячої води або пари. Розвиток біоенергетики узгоджується з міжнародними екологічними стандартами та енергетичною політикою, зокрема вимогами Паризького кліматичного саміту 2015 року, спрямованих на припинення до 2050 р. видобування та спалювання карбонвмісних (вугілля, нафти, газу, сланців, торфу тощо) природних ресурсів, зниження шкідливих викидів і підтримку використання відновлюваних джерел енергії [2].

У цьому контексті визначення регресійної залежності ККД котла від вологості біомаси є актуальним завданням, необхідним для створення інженерної методики розрахунку параметрів обладнання для енергоефективного спалювання.

Аналіз літературних джерел

У розвинутих країнах, зокрема в Данії та Нідерландах, частка спалювання відходів становить відповідно 54,3 % і 36,6 % [3]. У ЄС протягом 1995—2014 рр. рівень спалювання твердих побутових відходів (ТПВ) майже подвоївся, демонструючи найшвидше зростання серед усіх методів утилізації та підпорядковуючись гіперболічній залежності [4].

З економічного погляду, найдоцільнішим джерелом теплової енергії є тріска з твердих порід деревини, оскільки її використання забезпечує нижчу собівартість виробництва тепла порівняно з традиційними газовими котельнями [1]. До того ж спалювання цього виду біомаси за умови використання сучасних технологій очищення газів має мінімальний екологічний вплив, зменшуючи виснаження природних ресурсів і ризику для здоров'я населення.

Нижча теплота згоряння ТПВ становить 6,3...8,4 МДж/кг, а зі зменшенням вологості з 43 % до 20 % — підвищується до 9,14 МДж/кг [5]. Розглянуто можливість їхньої утилізації на комунальних ТЕЦ потужністю 12 МВт, які можуть працювати на суміші ТПВ, зневоднених до 20 % вологості, та кам'яного вугілля (16 % за масою), досягаючи нижчої теплоти згоряння 10,99 МДж/кг.

Попри екологічні та економічні переваги переходу котелень на спалювання біомаси, цей процес має певний недолік — необхідність очищення відхідних газів від зольних часток різними методами, зокрема електростатичним осадженням, тканинною або рукавною фільтрацією з використанням зносостійких матеріалів і систем самоочищення. Найпоширенішим способом газоочищення є використання циклонних фільтрів [6]. У таких установках формується вихровий потік, у якому під дією відцентрових сил тверді та рідкі частинки відокремлюються від газової фази та накопичуються у бункерах. Ефективність очищення в циклонах може досягати 95 %, що відповідає високим екологічним стандартам, проте залежить від дисперсності й густини пилу, а також від в'язкості газу, що змінюється з температурою.

У дослідженні [7] встановлено, що вміст вологи та тиск ущільнення є ключовими параметрами для отримання якісних паливних брикетів з горючих компонентів ТПВ теплотворною здатністю не менше 20 МДж/кг, що відповідає бурому вугіллю, і можуть спалюватися разом з ним на електростанціях. Експерименти проводилися за кімнатної температури без додавання в'язучих речовин за тиску 69...138 МПа та вологості 6...20 %. Встановлено, що для формування брикетів високої якості вміст вологи у суміші паперу та інших горючих матеріалів має бути меншим 15 %.

Запропоновано підхід [8], що базується на гіпотезі підвищення ефективності котлів, які працюють на рослинній біомасі, шляхом стабілізації процесу горіння через рівномірний розподіл палива площиною топки. Багатофакторні експерименти дозволили виявити основні закономірності та визначити напрями оптимізації конструкції котлів з урахуванням властивостей біосировини. Встановлено залежність коефіцієнта нерівномірності розподілу палива від висоти встановлення сопла навантажувача, кута нахилу регульовальної плити та інтенсивності подачі палива.

Доведено, що ТПВ не здатні до самостійного горіння за вологості, з якою вони надходять зі сміттєвозів, що зумовлює необхідність їхнього попереднього зневоднення [9]. Встановлено, що зниження вологості ТПВ на 25...40 % підвищує їхню питому теплоту згоряння у 1,6...2,2 рази. У дослідженні [10] подано регресійні залежності, які описують динаміку поширення методів спалювання ТПВ в Україні як з одержанням енергії, так і без неї.

Використання теплоти відхідних димових газів у котлах підвищує їхнє ККД на 1,9...2 %, що зменшує витрати основного палива на аналогічний рівень, знижуючи споживання електроенергії для власних потреб та обсяги викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище [11].

Зменшення вологості цукрової тростини з 42 % до 10 % для спалювання в печі з нерухомим шаром скорочує тривалість горіння у 3,4...6 разів [12].

Методику підбору секційних теплоутилізаційних установок з типових поверхневих калориферів подано у статті [13]. Кількість елементів, умови їхньої роботи («вологий» або «сухий» режим) та схема розміщення визначаються характеристиками теплових потоків димових газів котлів і потребою у нагріві води. Чисельні розрахунки дозволили отримати рівняння для визначення максимальної кількості теплоти, яку можна відводити шляхом охолодження димових газів у теплоутилізаційних системах.

Запропоновано установку для брикетування відходів деревообробної промисловості, яка підвищує їхню питому теплотворну здатність як твердого палива [14].

Проаналізовано ефективність теплоутилізаційних систем газоспоживних котлів у разі комбінованого використання відхідної теплоти для підігріву води та забезпечення потреб обладнання для водоочищення [15].

Дослідження [16] показали ефективність методу утилізації деревних відходів пресуванням у паливні брикети з використанням натурального сульфатного мила як в'язучого — побічного продукту виробництва лізину з деревної маси. Це зменшує екологічний вплив деревних і целюлозно-паперових відходів та забезпечує отримання якісного біопалива. Використання в'язучого дозволило знизити потужність двигуна на 40 % і підвищити густину брикетів на 10 %.

Запропоновано методику оцінки енергетичної ефективності теплоутилізаційної установки з повертливими калориферами, призначеної для глибокого охолодження димових газів котелень зі зволоженням дуттьового повітря [17].

Розглянуто технологію виготовлення паливних брикетів з техногенних відходів, непридатних для прямого використання в технологічних процесах, застосування якої дозволяє перетворювати промислові відходи на паливо, придатне для всіх типів котлів — від опалення приватних будинків до великих ТЕЦ [18]. Використання таких альтернативних джерел енергії сприяє зменшенню дефіциту первинних енергоносіїв та поліпшенню екологічної ситуації.

У роботі [19] запропоновано математичну модель нестационарного теплообміну в топці теплогенератора для розрахунку динаміки його ККД та оцінювання теплової інерційності.

Обґрунтовано використання вживаної деревини (ВЖД) як додаткового ресурсу сировини у разі її переробки на дерев'яні вироби, паливні гранули та брикети [20]. Розроблено методику оцінки потенціалу ВЖД та його балансу за категоріями. Потенціал деревної біомаси в Україні у 2012 р. становив 6,438 млн т, з яких 2,0 млн т припадало на ВЖД. Проведено моніторинг розподілу ВЖД за обласними центрами та визначено основні фізико-механічні властивості продукції. Математичні моделі дозволили встановити закономірності впливу ВЖД на властивості виробів та запропонувати режимні параметри для впровадження технологій у виробництво.

Проаналізовано вплив на температуру димових газів експлуатаційних параметрів газомазутних енергоблоків Київської ТЕЦ-5 [21]. Для котла ТГМП-314А показано, що ККД можна підвищити на 0,7 % без шкоди для конвективної шахти, зменшуючи питомі витрати умовного палива на 1,61 г/кВт·год під час спалювання природного газу.

Досліджено пресування біомаси для отримання паливних гранул та брикетів [22], зокрема вплив тиску й температури на щільність продукту. Встановлено, що підвищення температури понад 90...100 °С і тиску понад 120...140 МПа мало впливає на щільність та збільшує енерговитрати. Результати дозволяють визначати оптимальні конструкційно-технологічні параметри пресування дисперсних матеріалів для формування брикетів.

Обґрунтовано використання теплоти відхідних газів котельних установок, зокрема через утилізацію теплоти конденсації водяної пари в контактних теплообмінниках [23]. Встановлено, що максимальний приріст ККД досягається за повного використання енергії конденсації. Для цього запропоновано контактний тепломасообмінний апарат, у якому вода та димові гази рухаються односпрямованим висхідним потоком, що дозволяє охолоджувати гази нижче точки роси.

Результати розробки технологій виготовлення твердого біопалива з рослинних відходів та композитів на їхній основі узагальнено у монографії [24]. Наведено методику оцінки пружних коефіцієнтів двокомпонентного композитного біопалива та визначено вплив конструктивних параметрів фільтри на якість палива і енергетичні характеристики пресового обладнання. Експериментально досліджено технології виробництва пелет підвищеної якості з опалого листя, композитного палива на основі рослинних відходів із бурим вугіллям, а також рослинних та побутових ПЕТФ-відходів.

Встановлено, що використання низькотемпературної скидної теплоти димових газів конденсаційного котла для теплового насоса дає оптимальне охолодження газів для досягнення максимального корисного ефекту, як різниці між утилізованою теплотою і витратами енергії на компресор [25]. Показано, що ефект зростає зі збільшенням температури газів після першого теплообмінника, зі зниженням температури подачі води та підвищенням ККД теплового насоса.

Отримано регресійні залежності тиску пресування деревних відходів у паливні брикети від коефіцієнта ущільнення як у вигляді поліномів шостого порядку, так і за допомогою степеневої функції [26]. Встановлено, що степенева функція забезпечує достовірнішу апроксимацію з меншою

кількістю коефіцієнтів. Визначено умови формування брикетів достатньої міцності для транспортування та спалювання, а також досліджено вплив щільності тирси на тиск пресування.

Моделювання циклону ЦН-15-900 для очищення відхідних газів біомасового парогенератора та його режимів роботи в CFD-пакеті SolidWorks Flow Simulation виконано у науковій роботі [27].

Дослідження [28] показали, що на щільність паливних брикетів основний вплив має тиск пресування в робочій камері або формувальній головці, який має перевищувати зусилля виштовхування брикету. Це зусилля залежить від форми й довжини робочого каналу та сил тертя, визначених боковим тиском брикетів на стінки. Зміна осевого тиску впливає на боковий тиск, значною мірою визначений фізико-механічними властивостями матеріалу.

У статті [29] встановлено регресійні залежності витрат палива під час спалювання біомаси з і без утилізації відхідних газів від її вологості, що можуть використовуватися для розробки методики інженерних розрахунків параметрів обладнання для енергоефективного спалювання.

Попри значну кількість наукових праць щодо підвищення енергоефективності процесів спалювання біомаси, проведений авторами аналіз літературних джерел показав, що чітких кількісних або аналітичних математичних залежностей, які б описували зміну ККД котла від вологості біомаси, не встановлено.

Метою дослідження є визначення шляхом застосування методу регресійного аналізу регресійної залежності ККД котла під час спалювання біомаси від її вологості.

Результати досліджень

У табл. 1 показані експериментальні дані, що відображають залежність ККД котла за різної вологості палива — біомаси на прикладі дерев'яної тріски (що для теплогенераторів середньої потужності є одним із найпоширеніших видів біомаси) для котельні з номінальною тепловою потужністю 5 МВт [30].

Таблиця 1

Значення ККД котла за різної вологості палива — біомаси на прикладі дерев'яної тріски [30]

Вологість палива, %	ККД котла, %	Вологість палива, %	ККД котла, %
10	92	40	86,1
15	91	45	84,2
20	90	50	82,8
25	89	55	81,4
30	88	60	80
35	87	65	78,6

Регресійний аналіз здійснювався із застосуванням лініаризувальних математичних перетворень, що дали змогу звести початкову нелінійну залежність до лінійної форми, придатної для подальшої обробки. Це дозволило підвищити точність апроксимації та спростити інтерпретацію отриманих результатів. Коефіцієнти рівнянь регресії визначалися методом найменших квадратів [31], який забезпечує мінімізацію сумарної квадратичної похибки між експериментальними та розрахунковими даними. Для реалізації обчислень використано розроблену комп'ютерну програму “RegAnaliz”, призначену для статистичної обробки результатів однофакторних експериментів і побудови регресійних моделей. Програма має офіційне свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір [32] і детально описана у науковій праці [33], де зазначено її алгоритмічні особливості, подано структуру вхідних даних та приклади практичного застосування.

Програма “RegAnaliz” розроблена для проведення регресійного аналізу результатів однофакторних експериментів та дослідження парних залежностей між змінними. Її функціональні можливості дають змогу автоматично підбирати оптимальний тип апроксимувальної функції з-поміж 16 найпоширеніших математичних моделей — лінійних, степеневих, експоненційних, логарифмічних тощо. Вибір оптимальної моделі здійснюється за критерієм максимального коефіцієнта кореляції, що забезпечує найвищу достовірність відображення експериментальних даних. Результати розрахунків можуть зберігатися у форматах MS Excel, що спрощує їх подальший аналіз та графічну обробку, а також у графічному форматі Vitmap для ілюстративного представлення залежностей.

Результати проведеного регресійного аналізу — порівняльні характеристики отриманих математичних моделей залежності ККД котла від вологості біомаси — подано у табл. 2. Для кожного типу

апроксимувальної функції вказано значення основного статистичного показника — коефіцієнта кореляції R , що характеризує міцність зв'язку між досліджуваними величинами. Комірки, виділені сірим кольором, позначають типи регресійної залежності, для якої отримано максимальне значення коефіцієнта кореляції R , що забезпечує найвищу точність апроксимації експериментальних даних і можуть вважатися найадекватнішими для опису залежності ККД котла від вологості біомаси.

Таким чином, на підставі проведеного регресійного аналізу експериментальних даних, наведених у табл. 1, здійснено порівняння різних типів функціональних залежностей між ККД котла та вологістю біомаси. За критерієм максимального значення коефіцієнта кореляції R , що свідчить про найвищу відповідність моделі реальним даним, як найадекватнішу взято таку регресійну залежність:

$$ККД = 92,88 - 0,03977w^{1,411}, \quad \% \quad (1)$$

де $ККД$ — коефіцієнт корисної дії котла, %; w — вологість біомаси, %.

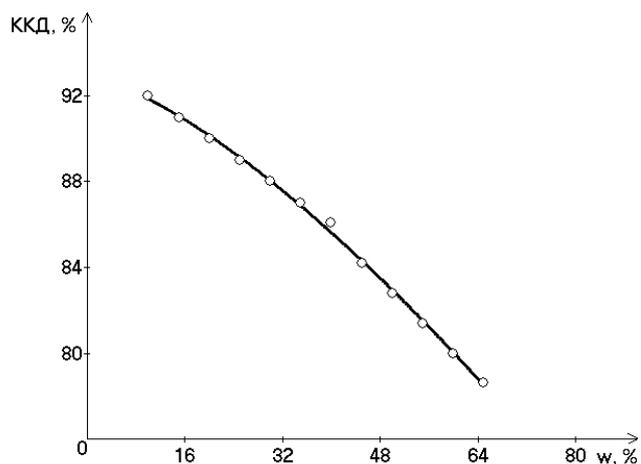
Таблиця 2

Результати проведеного регресійного аналізу залежності ККД котла під час спалювання біомаси від її вологості

№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R	№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R
1	$y = a + bx$	0,99520	9	$y = ax^b$	0,93595
2	$y = 1/(a + bx)$	0,99061	10	$y = a + b \cdot \lg x$	0,94271
3	$y = a + b/x$	0,82863	11	$y = a + b \cdot \ln x$	0,94271
4	$y = x/(a + bx)$	0,99861	12	$y = a/(b + x)$	0,99061
5	$y = ab^x$	0,99312	13	$y = ax/(b + x)$	0,80778
6	$y = ae^{bx}$	0,99312	14	$y = ae^{b/x}$	0,81831
7	$y = a \cdot 10^{bx}$	0,99312	15	$y = a \cdot 10^{b/x}$	0,81831
8	$y = 1/(a + be^{-x})$	0,41900	16	$y = a + bx^n$	0,99914

На рисунку подано графічну інтерпретацію отриманої регресійної залежності, яка відображає зміну ККД котла під час спалювання біомаси залежно від її вологості. Побудована крива, отримана з використанням рівняння регресії (1), демонструє добру узгодженість теоретичних результатів з експериментальними даними, що підтверджує достовірність та адекватність моделі. Отримана залежність також показує прийнятну збіжність з результатами, поданими у дослідженні [30], що свідчить про сталість виявленої закономірності та її практичну значущість для оцінювання енергоефективності процесу спалювання біомаси.

Аналіз побудованої графічної залежності (рис.) показав, що ККД котла під час спалювання біомаси зменшується зі збільшенням її вологості, причому характер цього зниження підпорядковується степеневій закономірності. Така тенденція свідчить про те, що зростання вологості палива призводить до інтенсивнішого витрачання теплоти на випаровування вологи, що також зменшує корисну частку енергії, переданої теплоносію. Виявлена закономірність узгоджується з термодинамічними особливостями процесу горіння біомаси та підтверджує доцільність попереднього підсушування палива для підвищення енергоефективності роботи котельного обладнання.



Залежність ККД котла при спалюванні біомаси від її вологості: \bullet — фактична; — — — теоретична

Висновки

1. Встановлено регресійну залежність ККД котла від вологості біомаси під час її спалювання, що дає змогу кількісно оцінити вплив вологовмісту палива на ефективність процесу теплогенерації. Отримана залежність може бути використана як аналітична основа для створення інженерної методики розрахунку параметрів котельного обладнання, оптимізованого для енергоефективного спалювання біомаси різного ступеня вологості.

2. Створено графічну інтерпретацію залежності ККД котла від вологості біомаси, що дає змогу наочно відобразити характер зміни ККД за варіювання вологовмісту палива. Побудована крива дозволяє порівняти теоретичні розрахунки з експериментальними даними, демонструючи достатню збіжність отриманих результатів та підтверджуючи адекватність вибраної регресійної моделі для практичного застосування.

3. Виявлено, що ККД котла під час спалювання біомаси зменшується зі зростанням її вологості, підпорядковуючись степеневій залежності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Н. Д. Степанова, Я. О. Глеба, і О. С. Чернобай, «Екологічні та економічні питання переведення промислової парової котельні на спалювання біомаси.» на *Енергоефективність в галузях економіки України – 2023*, Міжнар. наук.-техн. конф., 4 с. Вінниця: ВНТУ, [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2023/paper/viewFile/19481/16125>.
- [2] Г. Гелетуха, *Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні*, практичний посіб. Київ, 2015, 71 с.
- [3] Т. А. Орлова, «Екологічна оцінка земельних ділянок, зайнятих об'єктами поводження з відходами.» *Містобудування та територіальне планування*, наук.-техн. збірник, вип. 25, с. 167-181, 2006.
- [4] О. В. Березюк, В. О. Красівський, і Л. Л. Березюк, «Динаміка поширеності методів поводження з твердими побутовими відходами в ЄС.» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 104-109, 2020. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-148-1-104-109>.
- [5] В. К. Рижий, Т. І. Римар, і І. Л. Тимофєєв, «Утилізація твердих побутових відходів на наявних комунальних ТЕЦ.» *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, № 712, *Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація*, с. 17-22, 2011.
- [6] А. В. Ляшенко, Л. О. Тисовський, Л. М. Дорундяк, і Ю. Р. Дадак, «Обґрунтування конструкції циклона для очищення повітря на підприємствах деревообробної галузі.» *Науковий вісник НЛТУ України*, т. 21, № 9, с. 119-125, 2011.
- [7] Y. Li, H. Liu, and O. Zhang, “High-pressure compaction of municipal solid waste to form densified fuel,” *Fuel Processing Technology*, vol. 74, no. 2, pp. 81-91, 2001.
- [8] Г. А. Голуб, Н. М. Цивенкова, В. В. Чуба, С. М. Кухарець, Я. Д. Ярош, і М. Б. Терещук, «Дослідження ефективності роботи твердопаливного котла на рослинній біомасі.» *Технологічний аудит та резерви виробництва*, № 5/1(49), с. 22-28, 2019.
- [9] О. І. Сігал, та ін., «Дослідження кількості теплоти, що виділяється при спалюванні змішаних твердих побутових відходів м. Києва.» *Промислова теплотехніка*, т. 39, № 3, с. 78-84, 2017.
- [10] О. В. Березюк, і М. С. Лемешев, «Динаміка поширеності методів спалювання твердих побутових відходів в Україні.» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 6-10, 2022. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-6-10>.
- [11] М. М. Чепурний, І. М. Димнич, і О. В. Куцак, «Енергетична ефективність утилізації теплоти відхідних димових газів.» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 37-40, 2011.
- [12] C. Z. Sánchez, P. Gauthier-Maradei, and H. H. Escalante, “Effect of particle size and humidity on sugarcane bagasse combustion in a fixed bed furnace,” *Revista ION*, vol. 26, no. 2, pp. 73-85, 2013.
- [13] М. Ф. Боженко, «Методика вибору поверхневих утилізаторів теплоти димових газів в котельнях.» *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, т. 36 (75), № 1, с. 107-113, 2025.
- [14] О. В. Березюк, «Установка із вібраційним гідроприводом для брикетування відходів деревообробної промисловості.» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 149-152, 2007.
- [15] Р. О. Навродська, «Підвищення ефективності теплоутилізаційних технологій для котельних установок комунальної енергетики.» *Науковий вісник НЛТУ України*, т. 25, № 9, с. 225-229, 2015.
- [16] М. С. Мальований, Н. Ю. Вронська, І. С. Тимчук, В. М. Жук, і О. І. Мороз, «Використання звязуючого натурального походження для удосконалення технології створення паливних брикетів із деревних відходів.» *Водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг*, колективна моногр. Київ, Україна: Ярошенко Я. В., 2023, с. 91-105.
- [17] М. Ф. Боженко, і О. В. Озеруга, «Підвищення енергетичної та екологічної ефективності поверхневих теплоутилізаторів димових газів водогрійних котелень.» *KPI Science News*, № 1, с. 7-14, 2020.
- [18] О. М. Корчевський, А. М. Сурженко, і М. І. Садовой, «Визначення раціональних параметрів для отримання багатоконпонентних брикетів.» *Вісті Донецького гірничого інституту*, № 2(35), с. 9-15, 2014.
- [19] А. Ф. Строй, та Б. М. Федяй, «Математична модель нестационарного теплообміну в топці теплогенератора.» *Комунальне господарство міст*, № 79, с. 255-264, 2007.
- [20] С. В. Гайда, «Технології та рекомендації до використання вживаної деревини в деревообробленні.» *Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть*, міжвід. наук.-техн. зб., вип. 39.1, с. 48-67, 2013.
- [21] Т. В. Шелешей, «Розробка технічних рішень стосовно пониження температури димових газів при дослідженні впливу на них експлуатаційних і режимних параметрів.» *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, т. 30 (69), ч. 2, № 2, с. 48-53, 2019.
- [22] М. Костюнін, В. Карманов, і В. Михайлик, «Дослідження процесу пресування дисперсних матеріалів з метою отримання паливних гранул, брикетів.» *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільськогосподарства України*, № 17(2), с. 341-345, 2013.
- [23] І. О. Назарова, «Утилізація теплоти димових газів котельних агрегатів у теплообмінному апараті контактного типу.» *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, т. 33 (72), № 1, с. 212-216, 2022.
- [24] В. В. Клименко, В. І. Кравченко, В. І. Гуцул, і В. М. Боков, *Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та їх композитів*, моногр. Кропивницький, Україна: ПП «Ексклюзив-Систем», 2017, 162 с.
- [25] М. К. Безродний, і Н. О. Притула, «Ефективність роботи теплового насоса в системі теплопостачання з використанням теплоти відхідних газів після конденсаційного котла.» *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, № 5, с. 18-23, 2014.

[26] В. І. Савуляк, О. В. Березюк, В. П. Пурдик, і С. П. Білошицький, «Експериментальне визначення необхідних умов і параметрів процесу та приводу пресування паливних брикетів з відходів деревини,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 96-99, 2010.

[27] Н. Д. Степанова, Я. О. Глеба, і М. О. Паламарчук, «Утилізація теплоти димових газів після парогенератора на біомасі,» *на Інноваційні технології в будівництві*, Міжнар. наук.-техн. конф. Вінниця, 2024, 4 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2024/paper/view/22679/18720>.

[28] С. І. Левко «Огляд теорій процесу пресування,» *Вісник Львів. НАУ «Агроінженерні дослідження»*, № 15, с. 458-467, 2010.

[29] О. В. Березюк, і М. О. Паламарчук, «Залежність енергоефективності спалювання біомаси із утилізацією відхідних газів від її вологості,» *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, № 3, 8 с, 2025. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/857/800>.

[30] В. А. Мельник, та ін., «Досвід реалізації інтенсифікації теплообміну в підігрівниках цукрових заводів,» *Цукор України*, № 3 (111), с. 11-14, 2015.

[31] В. М. Михалевич, О. І. Шевчук, і Н. Л. Буга, «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. праць, вип. 14, с. 357-360, 2007.

[32] О. В. Березюк, «Комп'ютерна програма "Регресійний аналіз" ("RegAnaliz"),» *Свідчення про реєстрацію авторського права на твір № 49486*, Київ: Державна служба інтелектуальної власності України, дата реєстрації: 03.06.2013.

[33] О. В. Березюк, «Встановлення регресій параметрів захоронення відходів та потреби в ущільнювальних машинах на основі комп'ютерної програми "RegAnaliz",» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 40-45, 2014.

Рекомендована кафедрою безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 11.08.2025

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

Паламарчук Микола Олександрович — аспірант кафедри теплоенергетики.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. V. Bereziuk¹
M. O. Palamarchuk¹

Establishing the Regression Dependence of Boiler Efficiency while Combusting Biomass on its Moisture

¹Vinnitsia National Technical University

Biomass utilization by combustion makes it possible to reduce the consumption of traditional energy resources, which corresponds to the global trend towards the introduction of alternative and renewable energy sources and increasing the overall energy efficiency of industrial production. In this context, determining the regression dependence of the boiler efficiency on biomass moisture is an urgent scientific and technical task, since it can serve as the basis for developing an engineering methodology for calculating energy-efficient biomass combustion systems. The purpose of this study is to establish, using regression analysis, a functional relationship between the boiler efficiency and biomass moisture, which can be additionally applied in the development of an engineering methodology for designing energy-efficient thermal equipment. The study used regression analysis of single-factor experimental results and other pairwise dependencies, while the most adequate function was selected from sixteen common functional forms according to the criterion of the maximum correlation coefficient. Nonlinear dependencies were linearized using the appropriate linearizing mathematical transformations. The coefficients of the regression equations were determined using the least squares method, implemented in a specially developed computer program "RegAnaliz". As a result, a regression equation was obtained that describes the dependence of the boiler efficiency on the biomass moisture content. This relationship can be used for engineering calculations of equipment parameters to increase the energy efficiency of biomass combustion. Graphical interpretation of the obtained dependence was also constructed, which provides a clear visual representation and demonstrates an acceptable correspondence between theoretical predictions and experimental data. It was found that the boiler efficiency decreases with increasing moisture content in biomass according to the power law of dependence.

Keywords: boiler, efficiency, biomass, combustion, humidity, mathematical modeling, regression analysis, regression dependence.

Bereziuk Oleh V. — Dr. Sc. (Eng.), Associated Professor, Professor of the Chair of Security of Life and Pedagogic of Security, e-mail: berezyukoleg@i.ua ;

Palamarchuk Mykola O. — Post-Graduate Student of the Chair of Heat and Power Engineering