

О. В. Березюк¹
М. О. Паламарчук¹

ЗАЛЕЖНІСТЬ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ ДИМОВИХ ГАЗІВ ПІСЛЯ ПАРОГЕНЕРАТОРА НА БІОМАСІ ВІД ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ

Вінницький національний технічний університет

Розвиток відновлюваної енергетики має узгоджуватися з актуальними вимогами сучасної енергетичної політики та міжнародними стандартами, які передбачають скорочення викидів шкідливих речовин і стимулювання використання відновлюваних джерел енергії. Проведено дослідження залежності теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі від основних факторів впливу, з використанням планування експерименту другого порядку методом Бокса-Уілсона за допомогою ротатбельного центрального композиційного планування та застосовуючи розроблене програмне забезпечення, захищене свідоцтвом на твір. Метою дослідження є визначення за допомогою планування експерименту регресійної залежності теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі від основних факторів впливу. Отримано регресійну залежність теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі від основних факторів впливу: температури газів на вході, швидкості газів на вході. За допомогою критерію Фішера встановлено, що гіпотеза щодо адекватності отриманої регресійної моделі підтверджується з довірчою ймовірністю 95 %. Отримане значення коефіцієнта кореляції 0,97386, вказує на достатній рівень достовірності отриманих результатів. Отримана регресійна залежність може бути використана під час розробки методики інженерних розрахунків параметрів обладнання для енергоефективного спалювання біомаси. Встановлено, що серед факторів впливу, які розглядалися, найбільше на тепловий потік димових газів після парогенератора на біомасі впливає температура газів на вході, а найменше — швидкість газів на вході. Побудовано поверхню відгуку цільової функції — теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі та її двомірний переріз у площині параметрів впливу, що дозволяє наочно проілюструвати отриману залежність та характер комбінованого впливу декількох факторів на цільову функцію.

Ключові слова: математичне моделювання, планування експерименту, спалювання відходів, тепловий потік, димові гази, біомаса.

Вступ

В сучасній теплоенергетиці набуло значного поширення переведення промислових парогенераторів на спалювання твердої біомаси [1]. Така тенденція сприяє зниженню обсягів викидів шкідливих речовин, оскільки використання біомаси як палива може бути безпечнішим для довкілля порівняно з традиційними газовими котельнями. Особливо це актуально за умови, що біомаса заготовлюється та переробляється з дотриманням принципів екологічної сталості. Як відновлюване джерело енергії, біомаса під час згоряння виділяє таку ж кількість CO₂, яку рослини поглинули під час росту, що забезпечує певну екологічну рівновагу в цьому процесі. Хоча біомаса вважається вуглецево-нейтральним паливом, але її спалювання не повністю усуває проблему насичення повітряного середовища промисловими викидами, оскільки під час її спалювання довкілля забруднюється оксидами азоту NO_x, діоксинами, леткими органічними сполуками, твердими частинками. У вітчизняних котельнях для виробництва теплової енергії використовуються різні види біомаси, зокрема деревина та деревні відходи (тріска), солома, біопаливні гранули, біогаз, енергетичні культури, паливні брикети та лузга соняшника. Серед них найчастіше використовують деревну тріску, яку спалюють у теплогенераторах з метою одержання тепла у вигляді пари або гарячої води. Розвиток відновлюваної енергетики узгоджується з актуальними вимогами сучасної енергетичної

політики та міжнародних стандартів, які передбачають скорочення викидів шкідливих речовин і стимулювання використання відновлюваних джерел енергії [2]. Тому визначення регресійної залежності теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі від основних факторів впливу з метою розробки методики інженерних розрахунків параметрів обладнання для енергоефективного спалювання біомаси є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз літературних джерел

У дослідженні [1] визначено, що з економічної точки зору найвигіднішим джерелом теплової енергії є тріска деревини з твердих порід, оскільки використання цього виду біомаси забезпечує нижчу собівартість теплової енергії порівняно з традиційною газовою котельнею. До того ж спалювання тріски з твердих порід деревини має найменший негативний вплив на стан екосистем, рівень виснаження природних ресурсів та здоров'я населення порівняно з іншими видами палива.

Попри очевидні екологічні та економічні переваги переходу котелень на спалювання біомаси, існує і певний недолік — необхідність очищення відхідних газів після парогенератора від зольних часток. Для цього застосовують різні методи, зокрема електростатичне осадження пилу, фільтрацію за допомогою тканинних або рукавних фільтрів з використанням зносостійких матеріалів і технологій самоочищення. Одним з найпоширеніших способів газоочищення у подібних технологічних процесах є використання фільтрів циклонного типу [3]. У таких апаратах створюється вихровий потік повітря або газу, в якому під дією відцентрових інерційних сил тверді та рідкі частки відокремлюються від газової фази й накопичуються в спеціальних бункерах. Ступінь очищення газів у циклонах може сягати 95 %, що вважається високим показником ефективності з погляду екологічної безпеки виробництва. При цьому ефективність циклону значною мірою залежить від дисперсного складу і щільності пилових частинок, а також від в'язкості газу, яка змінюється відповідно до його температури.

У статті [4] описано підхід, що ґрунтується на гіпотезі про можливість підвищення ефективності функціонування котельного обладнання, яке працює на рослинній біомасі, за рахунок забезпечення інтенсивного та стабільного процесу горіння шляхом досягнення рівномірного розподілу палива по площині горіння. Проведення багатофакторного експериментального дослідження дозволило встановити ключові закономірності та визначити способи оптимізації конструктивних елементів котлів з урахуванням особливостей використання рослинної сировини. Зокрема, встановлено залежність коефіцієнта нерівномірності розподілу палива від таких параметрів, як висота встановлення сопла навантажувача, кут нахилу регульовальної плити до площини горіння та інтенсивність масової подачі палива.

Як показано в дослідженні [5], утилізація теплоти відхідних димових газів у котельних установках дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії котлів на 1,9...2 %, що також забезпечує скорочення витрат основного палива. Більше того, це сприяє зниженню споживання електроенергії для власних потреб підприємства та зменшенню обсягів викидів шкідливих речовин у довкілля.

У матеріалах статті [6] подано методики підбору секційних теплоутилізаційних установок, сформованих із типових поверхневих калориферів. Кількість таких елементів, умови їхньої експлуатації (у «сухому» або «вологодому» режимі) та схема розміщення визначаються на основі характеристик теплових потоків димових газів котлів і потреб у тепловій енергії для нагріву води. В результаті проведених чисельних розрахунків отримано рівняння, що дозволяють обчислити максимально можливі обсяги теплоти, які можна відвести шляхом охолодження димових газів у теплоутилізаційних системах.

У дослідженні [7] розглянуто ефективність роботи теплоутилізаційних систем газоспоживних опалювальних котлів за умов комбінованого використання утилізованої теплоти як для підігріву води в системі теплопостачання, так і для забезпечення потреб водоочисного обладнання.

Авторами статті [8] запропоновано методику оцінювання енергетичної ефективності теплоутилізаційної установки, оснащеної поверхневими утилізаторами-калориферами, яка призначена для глибокого охолодження димових газів котелень за умов зволоження дуттьового повітря.

У статті [9] подано математичну модель нестационарного теплообміну, що відбувається у топці теплогенератора. Розроблена модель дає змогу визначати температуру димових газів на виході з топки в будь-який момент часу, а також температуру внутрішньої та зовнішньої поверхні її стінки. До того ж модель дозволяє обчислювати зміну коефіцієнта корисної дії топки теплогенератора з часом і здійснювати оцінку її теплової інерційності.

У дослідженні [10] проаналізовано вплив експлуатаційних параметрів (температури та витрати живильної води) і режимних умов (теплова та електрична потужність енергоблока) на температуру димових газів газомазутних енергоблоків Київської ТЕЦ-5. Встановлено, що зі зростанням температури живильної води на 10 °С температура відхідних газів підвищується в середньому на 6 °С, незалежно від рівня електричної потужності. Показано, що для котла типу ТГМП-314А можливе підвищення коефіцієнта корисної дії до 0,7 % без шкоди для надійності нагрівальних поверхонь конвективної шахти під час спалювання природного газу. За таких умов питомі витрати умовного палива можуть зменшитися на 1,61 г у.п./кВт·год.

У роботі [11] обґрунтовано доцільність використання теплоти відхідних газів котельних установок, зокрема за рахунок утилізації теплоти конденсації водяної пари в контактних теплоутилізаторах. Зазначено, що значний приріст корисної теплоти можливий за повного використання теплової енергії, що виділяється під час конденсації водяної пари, присутньої в димових газах. Одним з ефективних підходів до такої утилізації є застосування контактних теплообмінників, які забезпечують охолодження димових газів до температур нижчих за точку роси. У якості утилізатора запропоновано контактний тепломасообмінний апарат, у якому вода, що нагріває, та димові гази рухаються односпрямованим висхідним потоком.

В матеріалах статті [12] встановлено, що у разі використання низькотемпературної скидної теплоти димових газів конденсаційного котла для потреб теплонасосної системи гарячого водопостачання існує певне оптимальне значення ступеня охолодження димових газів, за якого досягається максимальний корисний ефект. Цей ефект визначається як різниця між кількістю утилізованої теплоти продуктів згоряння та витратами енергії на роботу компресора теплового насоса. Показано, що цей ефект зростає зі збільшенням температури газів після першого теплообмінника (вхід у конденсатор теплового насоса), зі зниженням температури води, що подається у систему, а також з підвищенням коефіцієнта корисної дії теплового насоса.

В роботі [13] виконано моделювання циклону типу ЦН-15-900, що застосовується для очищення відхідних газів від парогенератора на біомасі, і його режимів роботи, в CFD-пакеті SolidWorks Flow Simulation, а також подано дані щодо теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі для різних значень температури та швидкості газів на вході.

Проте конкретних математичних залежностей теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі від основних параметрів впливу, в результаті аналізу відомих публікацій, авторами не виявлено.

Метою дослідження є визначення за допомогою планування експерименту регресійної залежності теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі від основних факторів впливу.

Результати досліджень

Серед параметрів, від яких залежить тепловий потік димових газів після парогенератора на біомасі, розглядалися такі: температура газів на вході, швидкість газів на вході, значення яких подано в табл.

Тепловий потік димових газів після парогенератора на біомасі за різних значень температури та швидкості газів на вході [13]

Температура газів на вході, °С	Тепловий потік димових газів після парогенератора на біомасі, Вт				
	Швидкість газів на вході, м/с	8,6	12,5	17	21
140		445,232	570,18	687,048	741,818
160		510,25	666,403	812,296	879,878
180		572,798	769,762	961,183	833,137
200		649,207	856,457	1085,84	1200,19

На основі даних таблиці, із застосуванням методу планування експерименту за ротатбельним центральним композиційним планом другого порядку за використання спеціалізованого програмного забезпечення, захищеного авторським свідоцтвом [14] і докладно описаного в джерелі [15], отримано рівняння регресії теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі

$$q = 255,8 - 5,689t + 49,14W + 0,2386tW + 0,02155t^2 - 2,033W^2, \quad (1)$$

де q — тепловий потік димових газів після парогенератора на біомасі, Вт; t — температура газів

на вході, $^{\circ}\text{C}$; W — швидкість газів на вході, м/с .

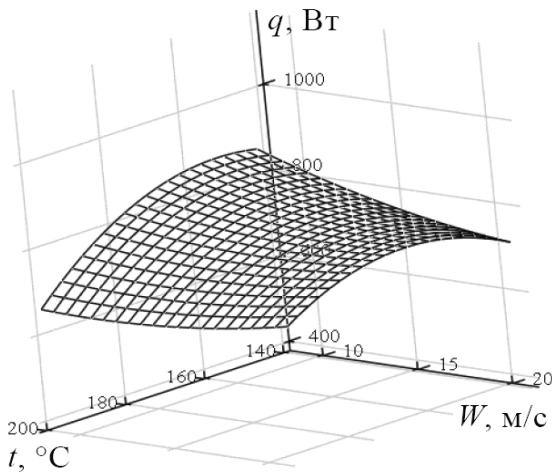
Наявність додатного знаку для квадратичного ефекту t свідчить про те, що за подальшого зменшення температури газів на вході t , подальше зменшення значення цільової функції (1) теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі носитиме згасальний характер, та наявність від'ємного знаку для квадратичного ефекту W свідчить про те, що з подальшим зростанням швидкості газів на вході W подальше збільшення значення цільової функції (1) теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі носитиме згасальний характер.

Згідно з критерієм Стюдента встановлено, що всі досліджувані фактори, їхні парні взаємодії, а також квадратичні ефекти є статистично значущими, а найбільше на тепловий потік димових газів

після парогенератора на біомасі серед досліджених факторів впливає температура газів на вході, найменше — швидкість газів на вході.

За допомогою критерію Фішера встановлено, що гіпотеза щодо адекватності регресійної моделі (1) підтверджується з довірчою ймовірністю 95 %. Отримане значення коефіцієнта кореляції, яке становить 0,97386, вказує на достатній рівень узгодженості між експериментальними та розрахунковими даними, що свідчить про достовірність і надійність отриманих результатів.

На рисунку показано поверхню відгуку цільової функції — теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі та її двовірний переріз у площині параметрів впливу, що дозволяє наочно проілюструвати залежність, описану рівнянням (1) та характер комбінованого впливу декількох факторів на цільову функцію.



Поверхня відгуку цільової функції — теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі та її двовірний переріз в площині параметрів впливу

Висновки

1. Встановлено, що на тепловий потік димових газів після парогенератора на біомасі впливають такі фактори: температура газів на вході, швидкість газів на вході. При цьому, найбільше на тепловий потік димових газів після парогенератора на біомасі серед досліджених факторів впливає температура газів на вході, а найменше — швидкість газів на вході.

2. Отримано адекватну регресійну залежність теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі від основних факторів впливу, яка може бути використана в процесі розробки методики інженерних розрахунків параметрів обладнання для енергоефективного спалювання біомаси.

3. Побудовано поверхню відгуку цільової функції — теплового потоку димових газів після парогенератора на біомасі та її двовірний переріз у площині параметрів впливу, що дозволяє наочно проілюструвати отриману залежність та характер комбінованого впливу декількох факторів на цільову функцію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Н. Д. Степанова, Я. О. Глеба, і О. С. Чорнобай, «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/egcu/egcu2023/paper/viewFile/19481/16125>.
- [2] Г. Гелетуха, *Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні*, практичний посіб. Київ, Україна, 2015. 71 с.
- [3] А. В. Ляшеник, 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.
- [4] Г. А. Голуб, Н. М. Цивенкова, В. В. Чуба, С. М. Кухарець, Я. Д. Ярош, і М. Б. Терещук, «Дослідження ефективності роботи твердopаливного котла на рослинній біомасі», *Технологічний аудит та резерви виробництва*, № 5/1(49), с. 22-28, 2019.
- [5] 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.
- [6] 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.

- [7] Р. О. Навродська, «Підвищення ефективності теплоутилізаційних технологій для котельних установок комунальної енергетики», *Науковий вісник НЛТУ України*, Т. 25, № 9, 2015, с. 225-229.
- [8] 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.
- [9] А. Ф. Строй, і Б. М. Федяй, «Математична модель нестационарного теплообміну в топці теплогенератора», *Комунальне господарство міст*, № 79, с. 255-264, 2007.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] М. К. Безродний, і Н. О. Притула, «Ефективність роботи теплового насоса в системі тепlopостачання з використанням теплоти відхідних газів після конденсаційного котла», *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*, № 5, с. 18-23, 2014.
- [13] 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>.
- [14] О. В. Березюк, «Комп'ютерна програма "Планування експерименту" ("PlanExp")», *Свідомство про реєстрацію авторського права на твір № 46876*, Київ: Державна служба інтелектуальної власності України, дата реєстрації: 21.12.2012.
- [15] О. В. Березюк, «Моделювання компресійної характеристики твердих побутових відходів у сміттєвозі на основі комп'ютерної програми "PlanExp"», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 23-28, 2016.

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

Dependence of the Heat Flow of Flue Gases After the Biomass Steam Generator on the Main Influencing Factors

¹Vinnitsia National Technical University

The development of renewable energy is consistent with the current requirements of modern energy policy and international standards, which provide for the reduction of emissions of harmful substances and the stimulation of the use of renewable energy sources. Study of the dependence of the heat flow of flue gases after a biomass steam generator on the main influencing factors was conducted using the second-order Box-Wilson experimental design using rotatable central composite planning using the developed software, which is protected by the Certificate for the work. The aim of the study is to determine, using experimental design, the regression dependence of the heat flow of flue gases after a biomass steam generator on the main influencing factors. Regression dependence of the heat flow of flue gases after a biomass steam generator on the main influencing factors was obtained: inlet gas temperature, inlet gas velocity. Using the Fisher criterion, it was established that the hypothesis regarding the adequacy of the obtained regression model is confirmed with a confidence probability of 95 %. The obtained value of the correlation coefficient, which is 0.97386, indicates a sufficient level of reliability of the obtained results. The obtained regression dependence can be used in the development of a methodology for engineering calculations of equipment parameters for energy-efficient biomass combustion. It was established that among the impact factors considered, the heat flow of flue gases after the biomass steam generator is most influenced by the temperature of the gases at the inlet, and the least by the velocity of the gases at the inlet. The response surface of the objective function — the heat flow of flue gases after the biomass steam generator and its two-dimensional section in the plane of the impact parameters — is constructed, which enables to clearly illustrate the obtained dependence and the nature of the combined impact of several factors on the objective function.

Keywords: mathematical modeling, experimental planning, waste incineration, heat flow, flue gases, biomass.

Bereziuk Oleh V. — Dr. Sc. (Eng.), Associated Professor, Professor of the Chair 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