

## ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 620.95; 697

### Дослідження пелетних котлів для підвищення ефективності системи опалення

*І. В. Шевчук<sup>1</sup>, Г. В. Лужанська<sup>2</sup>, Д. Ю. Шурко<sup>3</sup>, С. В. Бирко<sup>4</sup>, А. М. Гнідко<sup>5</sup>*<sup>1-5</sup>Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна✉ e-mail: <sup>1</sup>v\_i\_shevchuk@ukr.netORCID: <sup>1</sup><http://orcid.org/0009-0005-6537-1704>; <sup>2</sup><http://orcid.org/0000-0002-3784-5926>; <sup>3</sup><https://orcid.org/0009-0009-6734-2113>; <sup>4</sup><https://orcid.org/0009-0000-4135-1075>; <sup>5</sup><https://orcid.org/0009-0006-9904-6800>

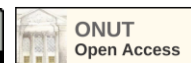
Необхідність економії паливно-енергетичних ресурсів в масштабі всієї планети змусила промислово розвинені країни проводити широкі дослідження з пошуку альтернативних джерел енергії і, перш за все, відновлюваних. Останнім часом у нашій країні все частіше починають застосовувати в системах опалення приватних будинків пелетні котли, що працюють на переробленій біомасі (відходи сільського господарства, лісозаготівельної та деревообробної промисловості). Вони є надійним засобом для обігріву, здатним забезпечити тепло не тільки в приватних будинках, а й на виробничих підприємствах або в готелях. Цей вид опалення заснований на використанні пелет – гранул, виготовлених із спресованих деревних відходів. Балансові випробування проводять при стаціонарному режимі роботи пелетного водогрійного котла. Для цього котел застосовують «IBC Heiztechnik GK-4K öko 25». Вимірювання витрати твердого палива можна проводити двома способами: при безпосередньому зважуванні бункера з пелетами на лабораторних вагах: на початку і в кінці випробувань та за видатковою характеристикою шнекового живильника. В ході виконаних випробувань для підвищення ефективності роботи пелетного котла системи водяного опалення були досліджені витрати пелет; параметри мережної води на вході у котел; параметри мережної води на виході з казана; витрати мережної води; температура повітря та відхідних газів; визначено коефіцієнт корисної дії пелетного паливного котла. Допустимі відхилення показань за час випробувань пелетного котла свідчать про те, що процес роботи котла на заданому навантаженні досяг стаціонарного режиму. За допомогою результатів вимірювань і обробки отриманої інформації визначено ККД котла за прямим балансом  $\eta = 86,52\%$ . Розбіжність між значенням, що наведено в паспортних даних котла, склало менше 1,4%. Однією з можливих причин розбіжності в ККД може бути тривале зберігання пелет, через що їх вологість, незважаючи на зберігання в закритих мішках, збільшилася, і як наслідок цього, зменшиться розрахункова теплота згоряння пелет.

**Ключові слова:** Пелети; Відновлювальне паливо; Пелетний котел; Система водяного опалення; Коефіцієнт корисної дії

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v62i2.3527>

© The Author(s) 2026. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

#### 1. Вступ

Енергетична криза 1973 ... 1975 років змусила світове співтовариство уточнити світові запаси ви-

копних видів палива. Розрахунки показали, що при існуючих темпах зростання споживання розвіданих енергоресурсів (запасів) вистачить на 200 ... 250 років.

Таким чином, необхідність економії паливно-енергетичних ресурсів в масштабі всієї планети змусила промислово розвинені країни проводити широкі дослідження з пошуку альтернативних джерел енергії і, перш за все, поновлюваних.

Особливо помітне зростання попиту на пелети в Європі та Північній Америці, де країни активно переходять на відновлювані джерела енергії.

У Європі пелетне опалення набуло найбільшого поширення вже досить давно. Головними споживачами пелет виступають Нідерланди та Бельгія: загалом на них припадає близько 6 млн. тонн на рік – а це понад 30% світового виробництва пелет. У Німеччині та Австрії з кожним роком зростає кількість пелетних котлів великої потужності. За статистикою, на котли потужністю від 30 кВт припадає понад 50% річного споживання пелет. Сьогодні пелетні котли в кілька сотень кіловат можна побачити в готелях, на спортивних об'єктах (на стадіонах, у басейнах тощо), у багатоповерхових будівлях, на складах та промислових об'єктах, у школах та дитячих садках [1, 2].

Ще в 80-ті роки минулого століття європейські країни з'ясували, що пелетні гранули як вид палива обходяться дешевше за дров, вугілля, нафту і газ і не шкодять екології.

Для створення комфортного мікроклімату в будинках та спорудах застосовується система водяного опалення. З метою підвищення її ефективності, в якості джерела тепла, у всьому світі все частіше застосовуються альтернативні джерела енергії.

Останнім часом у нашій країні все частіше починають застосовувати в системах опалення приватних будинків пелетні котли, що працюють на переробленій біомасі (відходи сільського господарства, лісозаготівельної та деревообробної промисловості). Пелети – це різновид альтернативного палива. Вони являють собою гранули, виготовлені з технічної деревини або висушених відходів за допомогою пресування їх під високим тиском [3].

Головна причина, через яку пелетне опалення виявляється вигіднішим – висока теплотворність палива та ефективність згоряння. При спалюванні одного кілограма пелет виділяється до 5 кВт·год. теплової енергії, а ККД сучасних котлів досягає 80-85%. Для порівняння, при використанні звичайних дров цей показник рідко перевищує 75%, а у електричних систем частина енергії неминуче втрачається під час передачі.

Якщо ж оцінювати попит на використання пелет в країнах ЄС, то можна простежити прямо пропорційну залежність між кількістю реалізованих котлів і середньою ціною на нафтопродукти. Як тільки ціна на нафту і природний газ зростає, так відразу ж підвищується інтерес до енергоефективних твердопаливних котлів систем опалення.

## 2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Відходи деревного виробництва для обігріву приміщень та нагрівання води люди використовують досить давно. Стружки, гілки, шматки кори використовувалися у звичайних дров'яних печах поряд із дровами не одне десятиліття. Однак перші професійні дров'яні печі з бункерами для тирси з'явилися лише на початку минулого століття на американських тартаках. У 1930 році в штаті Айдахо був винайдений прес-гранулятор: стиск під час пресування підвищує температуру тирси, при цьому виділяється лігнін – природне сполучне, що міститься в деревині, який склеює частки в щільні циліндрики. Виготовлені за допомогою першого преса пелети рекомендувалися як паливо для домашніх печей. Інтерес до опалювального обладнання, здатного використовувати як паливо ефективні та горючі відновлювані ресурси, зріс у 1973 році під час нафтової кризи [4, 5].

У 2002-2005 роках почалося широке використання пелет у котельнях потужністю від 0,5 до 2,5 МВт для опалення цілих житлових районів у європейських містах, особливо багатоповерхової забудови. Наприклад, на початку 2010 року в Лондоні відкрився готель Park Plaza Westminster Bridge London, який став найбільш екологічним готелем у британській столиці, оскільки опалення та гаряче водопостачання тут здійснюється за допомогою пелетної котельні.

Пелетні котли стають все більш популярними серед власників будинків та комерційних об'єктів завдяки своїй ефективності та екологічності. Вони є надійним засобом для обігріву, здатним забезпечити тепло не тільки в приватних будинках, а й на виробничих підприємствах або в готелях. Цей вид опалення заснований на використанні пелет - гранул, виготовлених із спресованих деревних відходів.

Виробництво і використання рослинного біопалива сприяє [6-8]:

- розвитку промисловості з випуску нової техніки та обладнання;
- створення відповідної інфраструктури та нових робочих місць;
- вдосконалення технологій виробництва біо-палива на основі досягнень науки і техніки;
- утилізації деревних і сільськогосподарських відходів;
- вирішення проблеми енергетичної та екологічної безпеки України.

Пелети (деревні гранули) – це нормовані вироби циліндричної форми, які виготовляють шляхом пресування під високим тиском попередньо подрібненої деревини.

Щоб отримати пелети високої якості, деревина має бути певним чином оброблена. Зокрема, необхідно провести гомогенізацію гетерогенної сировини, включаючи змішування, сушіння, подрібнення і руйнування структури деревини перед гранулювання [3, 9, 10].

У процесі грануляції деревне борошно нагрівається і виділяє природну речовину лігнін, що пов'язує частинки деревини. Потім нагріта органічна маса продавлюється через отвори спеціального барабана, приймають необхідну форму і розмір. При правильно організованому охолодженні гранули полімеризуються, набувають високу міцність і стійкість до осипання під час транспортування.

Сировиною для виготовлення деревинних пелет служать відходи:

- лісозаготівельної промисловості (тонкомірна і дров'яна деревина, верхівки, гілки, викривлені стовбури тощо);
- деревообробної промисловості (тирса, стружка, горбиль, обрізки і т.п.).

Пелети є частиною натурального кругообігу CO<sub>2</sub> у навколишньому середовищі. Пелети екологічно чисте паливо, тому що при їх згорянні виділяється рівно стільки CO<sub>2</sub>, скільки було всмоктане деревом при його зростанні (закритий вуглецевий обмін), на відміну від вугілля і т. д. [11]. Використання пелетів зберігає від рубання живий ліс та від забруднення відходами деревообробного виробництва навколишнє середовище. Крім того, пелети відносяться до відновлюваних джерел палива, на відміну від вугілля, нафти та газу.

Система опалення пелетним котлом виглядає наступним чином. Стандартний комплект обладнання автоматичного опалювального пелетного котла, як правило, включає в себе, наступне [4, 5, 12]:

- твердопаливний котел, обладнаний пальником для спалювання пелет;
- видатковий (оперативний) бункер для пелет;
- пристрій подачі палива з бункера в пальник;
- систему автоматики котла або пальника.

Таке обладнання для ефективної роботи системи опалення дозволяє забезпечити:

- автоматичну подачу палива в пальник;
- автоматичний розпал пелет;
- контроль полум'я пальника;
- стабільну підтримку заданої температури в приміщенні;
- високий ККД котла (більше 80 ... 85%) при використанні пелет відповідної якості;

- мінімум витрат часу на обслуговування (завантаження бункера пелетами проводиться один раз в 3-10 днів; видалення золи один раз в 5 ... 7 днів);

- безпеку роботи системи.

Для використання деревних гранул котел обладнаний спеціальним бункером для їх тимчасового зберігання і пелетним пальником факельного типу.

У схемі управління горінням задіється той чи інший набір датчиків, серед них – датчик захисту від порушення тяги, термостат захисту системи подачі палива від зворотного вогню, фоторезистор, контролюючий наявність полум'я, та інші. Для тонкої настройки роботи пальника застосовується так званий лямбда-зонд. Визначаючи кількість залишкового кисню в продуктах згорання, він надає блоку управління пальника або котла інформацію про те, як краще відрегулювати подачу повітря (підтримуючи співвідношення паливо/повітря). Робота пальника повністю автоматизована (розпал, загасання пальника, режим очікування, самоочищення від золи).

Всіма процесами управляє контролер пальника, підтримуючи задану користувачем температуру теплоносія. Автоматика «розумного» пелетного пальника може мати безліч функцій, в тому числі з управління елементами опалювальної системи (циркуляційним насосом, бойлером, змішувальним клапаном підлогового опалення та ін.).

Камера згорання (жарова труба) факельного пелетного пальника, виконана з жароміцного матеріалу, служить першим щаблем згорання палива. Гранули спалюються в ній на вкладеному колоснику з примусовою подачею необхідної кількості повітря. Утворені при цьому продукти повного і неповного згорання видаються в топку котла.

Жарова труба (перший ступінь горіння) повністю знаходиться всередині котла, через що зовнішня поверхня пальника під час роботи не нагрівається до високої температури.

Другий ступінь згорання (вторинна камера, або камера допалювання) являє собою топку котла. Крім вентилятора деякі факельні пальника оснащують власним пристроєм для подачі пелет в зону горіння.

Для побутових котлів частіше задіють живильник від витратного бункера: керований контролером пальника, він відсипає за допомогою гнучкої труби необхідну кількість пелет, які потрапляють безпосередньо на колосник жарової труби пелетного пальника.

Пелетні котли легко підключаються до будь-яких видів опалювальних систем: до теплих підлог, конвекторів, радіаторів, калориферів або теплообмінників [2, 5, 13, 14]. Їх можна комбінувати із сонячними колекторами, тепловими насосами та іншими видами опалювальних котлів. Вони встановлюються в спеціальному приміщенні, розташованому на першому поверсі, у підвалі будинку або в окремо розташованій споруді і призначені для опалення всієї будівлі та забезпечення будинку гарячим водопостачанням.

Метою роботи є підвищення ефективності системи водяного опалення за рахунок використання твердопаливного водогрійного котла, що працює на альтернативному паливі – пелетах.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання:

- провести балансові випробування пелетного котла;
- дослідити ефективність роботи пелетного котла для системи опалення.

## 2. Матеріали та методи досліджень.

Дослідимо ефективність роботи пелетного котла «IBC Heiztechnik GK-4K öko 25» (Німеччина) (рис. 1). Він відноситься до водогрійних котлів малої потужності та використовується для систем водяного опалення приватних будинків [12].

Котел чавунний, має один контур, призначений для спалювання кам'яного і бурого вугілля, дров, деревних брикетів і деревних пелет. Перша частина повітря отримала назву первинного, друга – вторинного. Одночасно з пуском котла відбувається включення в роботу електричного нагрівача первинного повітря.



Рисунок 1 – Пелетний котел «GK-4K öko 25»

Після нагріву первинного повітря і шару твердого палива, що лежить на решітці, відбувається підсушування вугілля (дров, брикетів, пелет), вихід летких речовин, займання і горіння летких речовин, займання і горіння твердої фази. При цьому утворюються високо температурні продукти згорання, які надходять в радіаційну і потім в конвективну частину котла, де нагрівають мережеву воду до заданої температури.

Частина золи відлітає з гарячими газами, частина осідає на поверхнях нагріву і невелика частка провалюється через отвори колосникових ґрат в зольне відділення.

Завантаження вугілля, дров або брикетів в топку здійснюється вручну на колосникові ґрати через спеціальні дверці котла.

Розпал палива, наявного на колосникових ґратах, може бути проведений в автоматичному і в ручному режимах. При автоматичному режимі, після натиснення відповідної кнопки, відбувається включення в роботу вентилятора, що подає першу частину повітря під колосникові ґрати і далі в шар лежачого на ній твердого палива. Інша частина повітря надходить в середню частину топки котла.

Технічні характеристики котла наведені в табл. 1.

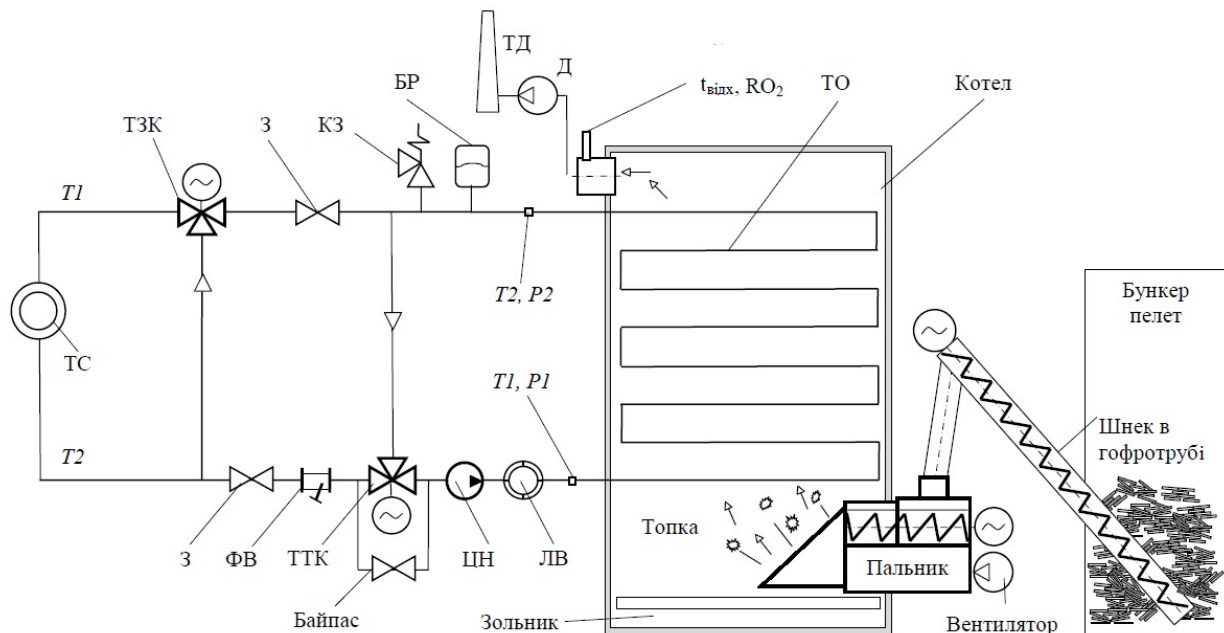
Балансові випробування проводять при стаціонарному режимі роботи пелетного водогрійного котла. Для цього котел «IBC Heiztechnik GK-4K öko 25» виводять на певне навантаження, наприклад номінальне, і витримують на цьому навантаженні 5-10 хв, стежачи за показаннями КВП і А.

**Таблиця 1** – Технічні характеристики котла «IBC Heiztechnik GK-4K öko 25»

Характеристика	Од виміру	Величина
Діапазон теплової потужності	кВт	8,0...28,0
Номінальна теплова потужність при роботі на пелетах	кВт	23,0
Номінальна теплова потужність при роботі на вугіллі	кВт	28,0
Розрахункова температура відхідних газів при роботі на пелетах	°С	120
Розрахункова температура відхідних газів при роботі на вугіллі	°С	250
Водяний об'єм котла	л	40,9
Максимальна температура води на виході з котла	°С	95
Мінімальна температура води на вході в котел	°С	60
Максимальний робочий тиск у водяному тракті котла	бар	4,0
Розрахункова розрядження в топці	Па	20
Витрата пелет при технічних параметрах DINplus		
- при номінальному навантаженні (100 %)	кг/год	5,30...5,60
- при мінімальному навантаженні (25 %)	кг/год	1,33...1,40
Розрахунковий ККД котла		
- при роботі на пелетах	%	87,9
- при роботі на вугіллі	%	83,6
Маса котла: без води/заповненого водою	кг	312/353
Розрахункова електрична потужність:		
- мінімальна	Вт	100
- максимальна (при роботі ТЕНа)	Вт	1200

В подальшому вимірювання знімають через кожні 3-5 хв, за винятком на газоаналізаторах, які виконують аналіз продуктів згоряння постійно, без перерви.

Принципова експериментальна схема котельної установки з твердопаливним пелетним водогрійним котлом «IBC Heiztechnik GK-4K öko 25» для системи опалення наведена на рис. 2.



**Рисунок 2** – Експериментальна схема котельної установки з пелетним котлом «IBC Heiztechnik GK-4K öko 25» для системи водяного опалення будинку: ЦН – циркуляційний насос системи опалення; ТЗК – триходовий змішувачий клапан регулювання температури подачі теплоносія в контур опалення; КЗ – клапан запобіжний; БР – бак розширювальний; ТД – труба димова; Д – димосос;  $t_{вих}, RO_2$  – точка вимірювання температури відхідних газів і відбору продуктів згоряння на газовий аналіз; З – засувка;

*ТО* – теплообмінник; *T1, P1, T2, P2* - точки виміру температури і тиску в трубопроводах прямої і зворотної води; *ТС* – тепловий споживач; *ТТК* – триходовий термічний клапан (з температурою спрацювання не нижче 55 °С); *ЛВ* – лічильник водяний; *ФВ* – фільтр водяний;  
*T1, T2* – трубопроводи прямої і зворотної води

Вимірювання витрати води через котел виконують за допомогою водяного лічильника, встановленого на трубопроводі подачі зворотної мережної води в котел.

Вимірювання температури води на вході і виході з котла – за допомогою термометрів, встановлених за місцем – на прямому і зворотному трубопроводах води. Там же встановлені манометри для визначення надлишкового тиску води в трубопроводах. Крім цього температуру води на виході з котла можна визначити за показниками ЖК-дисплея, який встановлений на кришці котла.

Вимірювання витрати твердого палива можна проводити двома способами:

- при безпосередньому зважуванні бункера з

пелетами на лабораторних вагах: на початку і в кінці випробувань;

- за видатковою характеристикою шнекового живильника.

Визначення змісту продуктів повного згоряння  $RO_2$  і  $O_2$  в складі йдуть з ПВК газів здійснюють за допомогою газоаналізатора ГХП-3М, а неповного згоряння – горючих газів  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ , за допомогою хроматографічного газоаналізатора. Отримані дані газового аналізу використовують для визначення коефіцієнта надлишку повітря.

Допустимі відхилення від середніх значень показань параметрів роботи котла за час випробувань не повинні перевищувати величин, наведених в табл. 2.

**Таблиця 2** – Допустимі відхилення показань за час проведення випробувань

Показники роботи	Позначення виміру, од	Допустимі відхилення, %
Витрата води через пелетний опалювальний котел	$G$ , м <sup>3</sup> /с	± 3
Витрата пелет	$B$ , кг/с	± 3
Температура води на вході в пелетний опалювальний котел	$t'$ , °С	-2 ... +5
Температура води на виході пелетний опалювальний котел	$t''$ , °С	-2 ... +5
Тиск води на вході пелетний опалювальний котел	$P'$ , МПа	± 5
Тиск води на виході пелетний опалювальний котел	$P''$ , МПа	± 5
Коефіцієнт надлишку повітря	$\alpha$	-5 ... +10

Встановлюють тривалість випробувань:

$$\Delta t = \tau_k - \tau_n \quad (1)$$

де  $\tau_n$ ,  $\tau_k$  – час початку і закінчення випробувань, с.

Масова витрата пелет за час випробувань:

$$\Delta M = M_n - M_k \quad (2)$$

де  $M_n$ ,  $M_k$  – маса бункера з пелетами (показання на технічних вагах) на початку і в кінці випробувань.

Розраховують середню витрату пелет, кг/с, за час випробувань:

$$B = \Delta M / \Delta t \quad (3)$$

Теплова потужність водогрійного котла:

$$N = G \cdot c \cdot (t'' - t') \quad (4)$$

де  $G$  – витрата води через котел, кг/с

$$G = \rho \cdot \frac{V_{вк} - V_{вн}}{\Delta t} = \rho \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (5)$$

де  $\rho$  – густина води, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{вн}$  – показники водяного лічильника на початку випробувань, л;  $V_{вк}$  – показники водяного лічильника в кінці випробувань, л;  $c$  – теплоємність води; при тиску  $P = 0,1 \dots 1,0$  МПа;  $c = 4,187$  кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $t'$ ,  $t''$  – температура води на вході і виході з котла, °С.

Визначити коефіцієнт корисної дії водогрійного котла можна прямим методом:

$$\eta = 100 \cdot \frac{N}{B \cdot Q_p^p} \quad (6)$$

де  $B$  – середня витрата пелет, кг/с,  $Q_p^p = 17460$  кДж/кг – розрахункова теплота згоряння пелет, кДж/кг.

### 3. Результати досліджень

Результати досліджень ефективності роботи пелетного котла для системи водяного опалення представлені у табличних формах:

- витрати пелет (таблиця 3);
- параметри мережної води на вході у котел (таблиця 4);
- параметри мережної води на виході з казана (таблиця 5);
- витрати мережної води (таблиця 6);

- температура повітря та відхідних газів (таблиця 7).

**Таблиця 3 – Витрати пелет**

Час, год, хв, с	Вага бункера з пелетами, кг
$\tau_{\text{П}} = 10$ год 20 хв	$M_{\text{П}} = 18,011$
$\tau_{\text{К}} = 10$ год 50 хв	$M_{\text{К}} = 15,550$
Час випробувань $\tau_{\text{К}} - \tau_{\text{П}}$	Масова витрата пелет $\Delta M = M_{\text{Г}} - M_{\text{К}}$
30 хв, або 30х60 = 1800 с	$\Delta M = 18,011 - 15,550 = 2,461$

**Таблиця 4 – Параметри мережної води на вході в котел**

Час, год., хв., с	$P'$ , кгс/см <sup>2</sup>	$t' = t_{\text{ЗВ}}$ , °С
$\tau_{\text{П}} = 10$ год 20 хв	2,20	62,5
$\tau_2 = 10$ год 25 хв	2,20	62,5
$\tau_{\text{К}} = 10$ год 50 хв	2,20	62,5
Час випробувань $\tau_{\text{К}} - \tau_{\text{П}}$	Середнє значення	Середнє значення
30 хв, або 30х60= 1800 с	2,20	62,5

**Таблиця 5 – Параметри мережної води на виході з котла**

Час, год., хв., с	$P''$ , кгс/см <sup>2</sup>	$t'' = t_{\text{ПР}}$ , °С
$\tau_{\text{П}} = 10$ год 20 хв	2,15	80,5
$\tau_2 = 10$ год 25 хв	2,15	80,5
$\tau_{\text{К}} = 10$ год 50 хв	2,15	80,5
Час випробувань $\tau_{\text{К}} - \tau_{\text{П}}$	Середнє значення	Середнє значення
30 хв, або 30х60= 1800 с	2,15	80,5

**Таблиця 6 – Параметри мережної води на виході з котла**

Час, год, хв, с	Показники водяного лічильника, л
$\tau_{\text{П}} = 10$ год 20 хв	$V_{\text{ВП}} = 88602,6$
$\tau_{\text{К}} = 10$ год 50 хв	$V_{\text{ВК}} = 88100,4$
Час випробувань $\tau_{\text{К}} - \tau_{\text{П}}$	Витрати мережної води $\Delta V = V_{\text{ВК}} - V_{\text{ВП}}$
30 хв, або 30х60= 1800 с	$88602,6 - 88100,4 = 502,2$ л

**Таблиця 7 – Температура повітря та відхідних газів**

Час, год., хв., с	$t_{\text{ХП}}$ , °С	$t_{\text{ВГ}}$ , °С
$\tau_{\text{П}} = 10$ год 20 хв	18	120
$\tau_{\text{К}} = 10$ год 50 хв	18	120
Час випробувань $\tau_{\text{К}} - \tau_{\text{П}}$	Середнє значення	Середнє значення
30 хв, або 30х60 = 1800 с	18	120

Середня масова витрата пелет за період випробувань:

$$B = 2,461/1800 = 1,367 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$$

де  $\Delta M$  – масова витрата пелет, кг, за час випробувань.

Визначаємо густину води  $\rho = 982,16 \text{ кг/м}^3$  при середньому значенні температури води на вході в котел  $t' = t_{\text{ЗВ}} = 62,5 \text{ °С}$ .

Масова витрата води через котел:

$$G = 982,16 \cdot \frac{502,2 \cdot 10^{-3}}{1800} = 0,274 \text{ кг/с}$$

Теплова потужність котла:

$$N = 0,274 \cdot 4,187(80,5 - 62,5) = 20,65 \text{ кВт}$$

де  $c$  – теплоємність води; при тиску  $P = 0,1 \dots 1,0$  МПа,  $c = 4,187 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ; ККД котла по прямому балансу складає 86,52%.

Розбіжність складає:  $87,9 - 86,52 = 1,38 \%$  є допустимим.

#### 4. Висновки

Підвищити ефективність роботи систем водяного опалення можливо із застосуванням твердопаливних водогрійних котлів, що працюють на альтернативному паливі – пелетах. Використання пелетних опалювальних котлів значно не тільки скорочує викиди у навколишнє середовище, а й заощаджує паливні ресурси.

Використання пелетних котлів у системах водяного опалення є одним із найбільш ефективних способів економії енергоресурсів, ці системи поєднують у собі екологічність, економічність, високу ефективність.

Під час проведених досліджень, допустимі відхилення показань за час випробувань пелетного котла свідчить про те, що процес роботи котла на заданому навантаженні досяг стаціонарного режиму.

За допомогою результати вимірювань і обробки отриманої інформації визначено ККД котла за прямим балансом  $\eta = 86,52 \%$ . Розбіжність з табличним, наведених в паспорті котла, склало менше 1,4%. Що є хорошим показником.

Однією з можливих причин розбіжності в ККД може бути тривале зберігання пелет в приміщенні, через що їх вологість, незважаючи на зберігання в закритих мішках, могла збільшитися. Внаслідок цього розрахункова теплота згоряння могла зменшитися.

#### Особистий внесок авторів CRediT

**Шевчук І.В.:** розробка методики дослідження пелетного котлу, постановка мети та задач дослідження. **Лужанська Г.В.:** аналіз літературних джерел. **Шурко Д.Ю.:** підготовка експериментальної схеми пелетного котлу. **Бирко С.В.:** проведення основних розрахунків роботи пелетного котлу. **Гнідко А.М.:** аналіз отриманих результатів.

#### Література

1. **M. Banja, R. Sikkema, M. Jégard, V. Motola, J.-F. Dallemand.** Biomass for energy in the EU – The support framework // *Energy Policy*. – 2019. – Vol. 131. – P. 215-228 <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.04.038>
2. **B. Monteleone, M. Chiesa, R. Marzuoli, V.K. Verma, M. Schwarz, E. Carlon, C. Schmidl, A. Ballarin Denti.** Life cycle analysis of small scale pellet boilers characterized by high efficiency and low emissions // *Applied Energy*. – 2015. – Vol. 155. – P. 160-170
3. **P. Basu.** Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. – Academic Press, Boston, 2013. – 530 p.
4. **A. Nordin, L. Pommer, M. Nordwaeger, I. Olofsson.** Biomass conversion through torrefaction // *Book Technologies for converting biomass to useful energy – combustion, gasification, pyrolysis, torrefaction and fermentation*. – Taylor&Francis Group. 2013. – 217 p.
5. **Juan F. González, Carmen M. González-García, Antonio Ramiro, Jerónimo González, Eduardo Sábido, José Gañán, Miguel A. Rodríguez.** Combustion optimisation of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler // *Biomass and Bioenergy*. – 2004. – Vol. 27, Issue 2. – P. 145-154 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.01.004>
6. **Гайденко О.М.** Технологічний процес заготівлі та використання рослинної біомаси як твердого палива: Монографія. – К.: Аграр. науки, 2017. – 144 с.
7. Енергетична стратегія України на період до 2030 року, затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 1071. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>
8. **Калетнік Г.М., Пришляк В.М.** Біопаливо: ефективність його виробництва та споживання в АПК України: Навчальний посібник. – К.: «Хай-Тек Прес», 2010. – 312 с.
9. **Schorr, C., Muinonen, M., Nurminen, F.** Torrefaction of biomass. – Miktech Oy, 2012. – 55 p.
10. **Nhuchhen, D.R., Basu, P., Acharya, B.** A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction // *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*. – 2014. – V.2014. – P. 506376.
11. **N. Mileva, P. Zlateva, M. Ivanov, K.Krumov, A. Terziev, A. Comarla.** Numerical and Experimental Analyses of Flue Gas Emissions, from Biomass Pellet Combustion in a Domestic Boiler // *Advances*

in Engineering. – 2025. – Vol. 6(10). – P. 257. <https://doi.org/10.3390/eng6100257>

12. Cast iron boiler with pellet burner, solid fuel «IBC GK – 4K 25 öko». Інструкція по монтажу та експлуатації. – IBC Heiztechnik, 2013. – 70 с.

13. **P. Duarah, D. Haldar, A. Kumar Patel, Cheng-Di Dong, R. Rani Singhania, M. Kumar Purkait.** A review on global perspectives of sustainable development in bioenergy generation // Bioresource Techno-

logy. – 2022. – Vol. 348. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126791>

14. **O. Svedovs, A. Sturmane, M. Feofilovs, V. Kir-sanovs, F. Romagnoli.** Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of wood and alternative biomass pellet feedstocks for decentralized heating using experimental data // Biomass and Bioenergy. – 2026. – Vol. 208. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108880>

Отримана в редакції 10.04.2026, прийнята до друку 24.04.2026

## Research of pellet boilers to increase the efficiency of the heating system

**Volodymyr Shevchuk<sup>1</sup>✉, Ganna Luzhanska<sup>2</sup>, Dmytro Shurko<sup>3</sup>, Sergey Byrko<sup>4</sup>, Andrii Hnidko<sup>5</sup>**

<sup>1-5</sup>National University "Odesa Polytechnic", 1 Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine

✉ e-mail: <sup>1</sup>[v\\_i\\_shevchuk@ukr.net](mailto:v_i_shevchuk@ukr.net)

ORCID: <sup>1</sup><http://orcid.org/0009-0005-6537-1704>; <sup>2</sup><http://orcid.org/0000-0002-3784-5926>; <sup>3</sup><https://orcid.org/0009-0009-6734-2113>; <sup>4</sup><https://orcid.org/0009-0000-4135-1075>; <sup>5</sup><https://orcid.org/0009-0006-9904-6800>

*The need to save fuel and energy resources on a global scale has forced industrialized countries to conduct extensive research into alternative energy sources, and above all, renewable ones. Recently, in our country, pellet boilers that run on processed biomass (wastes from agriculture, logging and woodworking industries) have increasingly been used in heating systems for private homes. They are a reliable means of heating that can provide heat not only in private homes, but also in industrial enterprises or hotels. This type of heating is based on the use of pellets - granules made from compressed wood waste. Balance tests are carried out in stationary operation of a pellet water heating boiler. For this, the boiler is used "IBC Heiztechnik GK-4K öko 25". Solid fuel consumption can be measured in two ways: by directly weighing the hopper with pellets on laboratory scales: at the beginning and end of the tests and by the consumption characteristic of the screw feeder. During the tests performed to increase the efficiency of the pellet boiler of the water heating system, the pellet consumption was investigated; parameters of network water at the boiler inlet; parameters of network water at the boiler outlet; network water consumption; air and exhaust gas temperatures; the efficiency of the pellet fuel boiler was determined. The permissible deviations of the readings during the tests of the pellet boiler indicate that the boiler operation process at a given load has reached a stationary mode. Using the results of measurements and processing of the information obtained, the boiler efficiency was determined by direct balance  $\eta = 86.52\%$ . The discrepancy between the value given in the boiler passport data was less than 1.4%. One of the possible reasons for the discrepancy in efficiency may be the long-term storage of pellets, due to which their humidity, despite being stored in closed bags, has increased, and as a result, the calculated calorific value of the pellets will decrease.*

**Keywords:** Pellets; Renewable fuel; Pellet boiler; Water heating system; Efficiency.

### References

1. **M. Banja, R. Sikkema, M. Jégard, V. Motola, J.-F. Dallemand.** (2019) Biomass for energy in the EU – The support framework. *Energy Policy*, 131, 215-228
2. **B. Monteleone, M. Chiesa, R. Marzuoli, V.K. Verma, M. Schwarz, E. Carlon, C. Schmidl, A. Ballarin Denti.** (2015) Life cycle analysis of small scale pellet boilers characterized by high efficiency and low emissions. *Applied Energy*, 155, 160-170
3. **P. Basu.** (2013) Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. *Academic Press, Boston*, 530 p.
4. **A. Nordin, L. Pommer, M. Nordwaeger, I. Olofsson.** (2013) Biomass conversion through torrefaction. Book Technologies for converting biomass to useful energy – combustion, gasification, pyrolysis, torrefaction and fermentation. *Taylor&Francis Group*, 217.

5. **Juan F. González, Carmen M. González-García, Antonio Ramiro, Jerónimo González, Eduardo Sa-bio, José Gañán, Miguel A. Rodríguez.** (2004) Combustion optimisation of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler. *Biomass and Bioenergy*, 27, 2, 145-154
6. **Gaidenko, O.M.** (2017) Technological process of harvesting and using plant biomass as solid fuel: Monograph. *Kyiv: Agrar. nauki*, 144.
7. Energy Strategy of Ukraine for the period until 2030, approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 07/24/2013 No. 1071.
8. **Kaletnik, G.M., Pryshlyak, V.M.** (2010) Biofuel: efficiency of its production and consumption in the agro-industrial complex of Ukraine: Textbook. *Kyiv: «High-Tech Press»*, 312.
9. **Schorr, C., Muinonen, M., Nurminen, F.** (2012) Torrefaction of biomass. *Miktech Oy*, 55.
10. **Nhuchhen, D.R., Basu, P., Acharya, B.** (2014) A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, 2014, 506376.
11. **N. Mileva, P. Zlateva, M. Ivanov, K. Krumov, A. Terziev, A. Comarla.** (2025) Numerical and Experimental Analyses of Flue Gas Emissions, from Biomass Pellet Combustion in a Domestic Boiler. *Advances in Engineering*, 6(10), 257.
12. (2013) Cast iron boiler with pellet burner, solid fuel «IBC GK – 4K 25 öko». Installation and operating instructions. *IBC Heiztechnik*, 70.
13. **P. Duarah, D. Haldar, A. Kumar Patel, Cheng-Di Dong, R. Rani Singhania, M. Kumar Purkait.** (2022) A review on global perspectives of sustainable development in bioenergy generation. *Bioresource Technology*, 348.
14. **O. Svedov, A. Sturman, M. Feofilov, V. Kir-sanov, F. Romagnoli.** (2026) Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of wood and alternative biomass pellet feedstocks for decentralized heating using experimental data. *Biomass and Bioenergy*, 208.

---

Received 10 April 2026  
Approved 24 April 2026  
Available in Internet 31 May 2026