

УДК 621.18

Л. А. Боднар, канд. техн. наук, доц.; Д. В. Степанов, канд. техн. наук, доц.**ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ЖАРОТРУБНОГО
ПАРОГЕНЕРАТОРА**

В роботі виконано огляд сучасних конструкцій жаротрубних парогенераторів, представлених на ринку опалювального обладнання та проведено порівняно з конструкціями водотрубних парогенераторів. Відзначено, що конструктивно водотрубні котли значно складніші за жаротрубні аналоги. Здійснено класифікацію конструктивних особливостей жаротрубних парогенераторів за такими ознаками: будовою топки, особливостями газоходів, за режимами експлуатації, за наявністю хвостових поверхонь нагріву, тощо. Проаналізовані особливості теплового розрахунку жаротрубного парогенератора. Виявлено, що наявні методи теплового розрахунку розроблені для водотрубних котлоагрегатів і не в повній мірі відповідають умовам роботи жаротрубних котлів. Запропоновані уточнення до Нормативного методу теплового розрахунку котлоагрегатів, що дозволяють проводити теплові розрахунки горизонтальних жаротрубних триходових парогенераторів. Проведене дослідження показників жаротрубного парогенератора паровидатністю 12 т/год на різних навантаженнях.

На основі розробленої математичної моделі проведено перевірний розрахунок триходового жаротрубного парогенератора, в результаті якого визначено температури газів на виході з топки, першого та другого ходів теплообмінника. Виконано співставлення результатів моделювання з показниками роботи котла згідно режимної карти, а також даними інших авторів та виробників жаротрубних парогенераторів. Визначено інші важливі параметри роботи парогенератора: теплову напругу топкового об'єму, температуру стінки парогенеруючої поверхні, тощо. За результатами досліджень виявлено співвідношення потужностей топки та гозотрубних пучків горизонтального триходового парогенератора і порівняно отримані результати з даними відомих виробників парогенераторів. Виконано оцінку теплової напруги об'єму топки. Зазначено, що уточнення методики теплового розрахунку котла дозволить розробляти та впроваджувати сучасні вітчизняні високоефективні парогенератори, що призведе до скорочення споживання енергоресурсів, викидів в навколишнє середовище та прискорить розвиток вітчизняного котлобудування.

Ключові слова: парогенератор, коефіцієнт корисної дії, температура відхідних газів, коефіцієнт тепловіддачі, площа поверхні теплообміну, топка, теплова напруга топкового об'єму.

Вступ

В промисловості набули широкого розповсюдження парові жаротрубні котли. На ринку опалювального обладнання України розповсюджені жаротрубні парогенератори таких закордонних виробників: Viessmann [1], Standard Kessel [2], Garioni Naval [3], Navi [4], Bosch [5], Unical [6], ICI Caldaie [7], серед українських виробників відомий Eurotherm [8].

Жаротрубні парові котли дозволяють вирішити більшість задач паропостачання технологічних процесів в промисловості, забезпечуючи необхідну продуктивність і тиск пари. В експлуатації жаротрубні котли надійні та економічні. Огляд інформації розміщеної на сайтах [1 – 8], показав, що коефіцієнт корисної дії котлів знаходиться в межах 90 – 92 % без економайзера та 94 – 95 % з економайзером. Температура пари знаходиться в межах від 119,6 °С (модель BANR UNO від Unical) до 300 °С (модель Universal UL-SX від Bosch). В основному жаротрубні парові котли зазначених виробників генерують насичену водяну пару з тиском до 12 бар і температурою до 190 °С. Паровидатність жаротрубних парових котлів з однією топкою, як правило, не перевищує 26 т/год, з двома камерами згорання – 50 т/год [1].

В Україні в основному виготовляють водотрубні парові котли. Українські виробники, зокрема [9, 10] виробляють водотрубні парогенератори типу «Е», «ДЕ», «КЕ», «ДКВР». Ці Наукові праці ВНТУ, 2026, № 1

котли належать до вертикально-водотрубних двобарабанных котлів з природною циркуляцією і призначені для вироблення насиченої водяної пари абсолютним тиском до 14 бар і паропродуктивністю до 25 т/год.

Жаротрубні котли як правило виготовляють на тиск до 25 бар, а водотрубні – навіть для тисків більше 125 бар [11]. Водотрубні парогенератори можуть містити пароперегрівник і виробляти як насичену так і перегріту пару, а жаротрубні котли переважно відпускають насичену пару.

У минулому столітті використання жаротрубних котлів було обмежено через ряд аварій, причиною яких стали помилки під час проєктування та конструювання. Такі помилки побічно вказують на фактичні недоробки розрахункових методик конструювання жаротрубних котлів, а також на складність реальних теплофізичних процесів, що відбуваються в газоповітряному та водяному трактах.

Як зазначено в роботі [12] розроблення та впровадження сучасних вітчизняних вискоелективних котлів дозволить скоротити споживання енергоресурсів, обсяги шкідливих викидів в атмосферу, а також дасть поштовх розвитку вітчизняного котлобудування. Тому дослідження особливостей роботи і методів розрахунку жаротрубних парових котлів є актуальними.

Метою цієї роботи є аналіз конструктивних особливостей та методів розрахунку горизонтальних жаротрубних парових котлів, дослідження показників роботи жаротрубного котла паровидатністю 12 т/год на різних навантаженнях.

Конструктивні особливості парових котлів

Конструктивно водотрубні котли значно складніші за жаротрубні аналоги. Вони складаються з багатьох агрегатів і вузлів, у з'єднаннях яких повинні бути виключені будь-які нещільності, особливо при високих значеннях тиску та температури. У більшості випадків водотрубні котлоагрегати постачаються у вигляді кількох укрупнених блоків, що вимагає додаткових витрат під час доставки котла, його збиранні та монтажі на будівельному майданчику. Цього недоліку позбавлені жаротрубні водогрійні котли, що повністю виготовляються в заводських умовах і постачаються у вигляді компактною моноблочної конструкції, що, у свою чергу, суттєво спрощує монтаж обладнання в котельні.

Основними випарними поверхнями в водотрубних котлах є топкові екрани, що покривають стіни топки, та конвективні пучки (рис. 1). У топках тепловіддача від газів відбувається, в основному, за допомогою випромінювання, в пучках – переважно конвекцією.

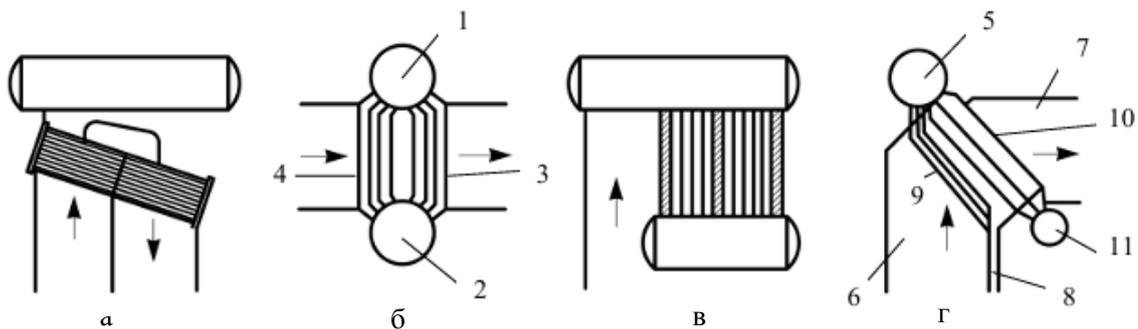


Рис. 1. Схеми конвективних випарних поверхонь водотрубних котлів [13]

а) горизонтально-водотрубні котли низького тиску; б) і в) вертикально-водотрубні котли низького тиску;
г) енергетичні котли середнього тиску

1 – верхній барабан; 2 – нижній барабан; 3 – опускні труби; 4 – підйомні труби; 5 – барабан;
6 – топка; 7 – горизонтальний газохід; 8 – труби заднього екрана топки; 9 – трьохрядний фестон; 10 –
конвективний пучок; 11 – колектор

Конструктивно жаротрубні парогенератори відрізняються від водотрубних парових котлів типу Е, ДЕ, ДКВР, БМ, тощо тим, що в них димові гази рухаються в трубах, а процес нагрівання води і пароутворення відбувається в міжтрубному просторі. Крім того, в жаротрубних парових котлах топка має циліндричну форму, в конструкції відсутній барабан. Жаротрубні парогенератори мають значні водяний та паровий об'єми.

Основною випарною поверхнею в жаротрубних парових котлах є конвективна частина котла – теплообмінник (рис. 2) [14].

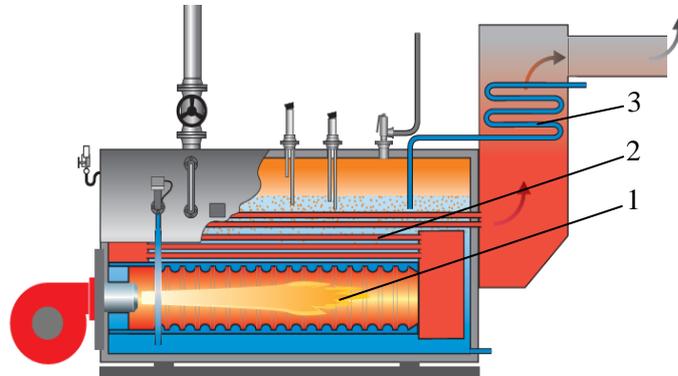


Рис. 2. Схема жаротрубного парогенератора Viessmann: 1 – топка; 2 – теплообмінник; 3 – економайзер

Огляд конструкцій парових жаротрубних котлів дозволив систематизувати їх конструктивні ознаки. По конструкції циліндричної топки: з хвилястою або гладкою поверхнею. По кількості жарових труб: з однією або двома топками. За наявності економайзера: з економайзером, без економайзера. По режиму експлуатації: робота в базовому режимі; робота в маневреному режимі. По ходу димових газів: з поворотом димових газів (реверс) в жаровій трубі (двоходові) (рис. 3, а); без повороту (реверсу) (триходові) (рис. 3, б). По наявності охолодження задньої стінки: з охолодженням, без охолодження [15].

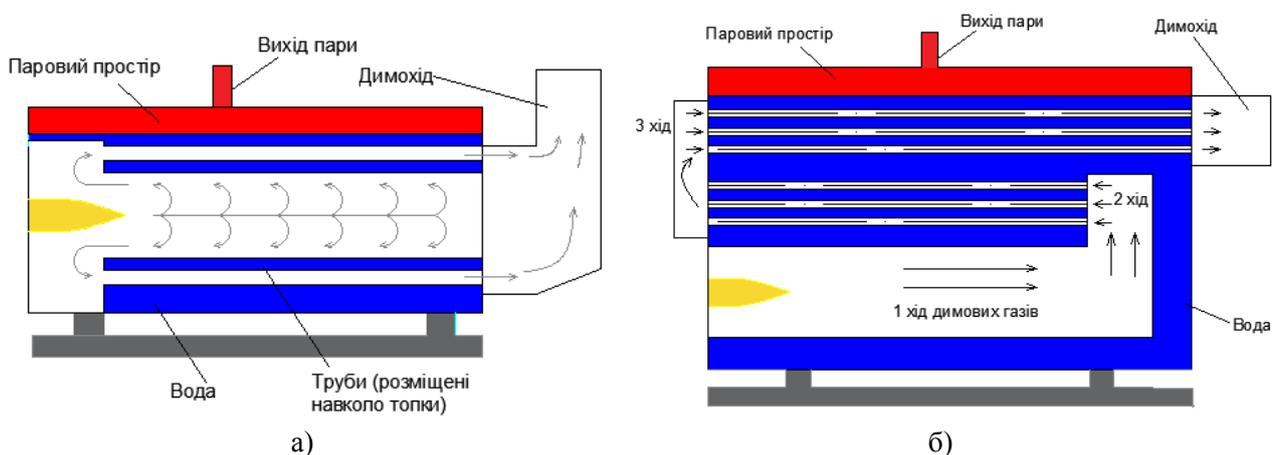


Рис. 3. Схема жаротрубних парогенераторів: а) з реверсивною топкою; б) триходовий

Отже, конструктивні відмінності водотрубних і жаротрубних парогенераторів значні і можуть суттєво впливати на тепловий розрахунок парогенератора.

Методи розрахунку жаротрубних парових котлів

Для здійснення перевірних або конструктивних розрахунків водотрубних парогенераторів використовують «Нормативний метод теплового розрахунку котлоагрегатів». В дисертаційній роботі [16] вказано, що наявні методи теплового розрахунку топків і поверхонь

нагріву дозволяють визначити загальне теплосприймання поверхонь топки, але не можуть виявити і характеризувати локальні теплофізичні та механічні ефекти, які супроводжують роботу топок. Автором [16] запропоновано концепцію розрахунку топки жаротрубно-водотрубного водогрійного котла, основу на експериментальних дослідженнях та CFD – моделювання. Ця методика не підходить до розрахунку жаротрубних топок без додаткової поверхні нагріву.

Авторами [17] проведено огляд літератури по методах розрахунку топки і конвективної частини жаротрубних котлів. В цій роботі немає рекомендацій по розрахунку жаротрубних парогенераторів з циліндричною топкою. Зазначені в роботі методи розрахунку теплообміну в топці ґрунтуються на радянському Нормативному методі. Методика розрахунку, опублікована в Нормативному методі, може, на нашу думку, адекватно описати тепломасообмінні процеси в газотрубному теплообміннику, але для розрахунку топки жаротрубного котла доступної інформації у відкритих джерелах недостатньо.

Метою розрахунку теплообміну в топці є визначення температури продуктів згорання на виході з топки за заданій її конструкції і заданих умовах роботи (перевірний розрахунок) чи визначенні величини теплосприймальних поверхонь, при яких забезпечується задана температура на виході з топки (конструктивний розрахунок). В інженерній практиці в Україні застосовується метод розрахунку, створений ще в колишньому СРСР, оснований на сумісному використанні для розрахунку законів променевого теплообміну і застосування теорії подібності до топкових процесів. Функціональна залежність визначальних критеріїв від різних факторів встановлена на основі експериментальних даних, отриманих в результаті досліджень водотрубних парогенераторів.

Для визначення безрозмірної температури газів на виході з топки котла в Нормативному методі теплового розрахунку використовується залежність:

$$\theta''_T = \frac{T''_T}{T_a} = \frac{Bo^{0,6}}{M \cdot \text{Вї}^{0,3} + Bo^{0,6}}, \quad (1)$$

де T_a – адиабатна температура, К; T''_T – температура газів на виході з топки, К; Bo – критерій радіаційного теплообміну Больцмана; Вї – ефективне значення критерію Бугера; M – параметр, що враховує вплив на інтенсивність теплообміну відносного рівня розташування пальників, міри забаластованості топкових газів та інших факторів.

Для камерних топок параметр M згідно Нормативного методу визначається за формулою:

$$M = M_0 \cdot (1 - 0,4 \cdot x_T)^{\sqrt[3]{\gamma_v}}, \quad (2)$$

де M_0 – коефіцієнт, значення якого залежить від типу топки, зокрема для газомазутних топок при настінному розташуванні пальників $M_0=0,4$, а при подовому розташуванні – $M_0=0,36$; x_T – відносний рівень розташування пальників в топці; γ_v – міра забаластованості.

У роботі [18] зазначено, що параметр M призначений для розрахунку ступеня однорідності температурного поля в топці котла і визначається згідно з найбільшою температурою, яка в свою чергу, визначається за положенням пальників на стінках котла. Проте Нормативний метод орієнтований на котли з вертикальним напрямком розвитку факела. Для топок горизонтального типу характерне інше (горизонтальне) поширення факела, що потребує врахування при розрахунках. Параметр M в [18] пропонується визначати за формулою $M = 0,54 - 0,2 \cdot x_T$, а відносно положення максимуму температури полум'я в таких умовах пропонується приймати $x_T = 0,3$ м.

В Нормативному методі недостатньо інформації щодо визначення кутових коефіцієнтів екранів для циліндричної топки з гладкою чи хвилястою поверхнею, а також для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі від стінки топки до киплячої води.

Результати дослідження

Для уточнення розрахункової методики проведено дослідження показників роботи жаротрубного горизонтального триходового парогенератора CONDOR HD-01-12. Парові Наукові праці ВНТУ, 2026, № 1

котли CONDOR виготовляють паропродуктивністю 2,6 – 27 т/год з однією топкою. Котли заповнюються підготовленою водою. Для рівномірного розподілу води у просторі котла є спеціальна конструкція. Для періодичного продування застосовується спеціальний клапан за допомогою якого, шляхом різкого відкриття видаляється шлам з днища котла. Котли оснащені пристроями управління періодичною продувкою.

Парогенератор встановлено на одному з підприємств м. Вінниця. Котел має топку циліндричного профілю, площею 28,3 м², газотрубний теплообмінник має два ходи і загальну площу нагрівання 255 м². Котел працює на природному газі з теплотою згорання 35,5 МДж/м³. Коефіцієнт надлишку повітря в димових газах згідно режимної карти 1,17. Конструкція котла газощільна, тобто присмоктувань повітря немає, тому коефіцієнт надлишку повітря незмінний вздовж газоходів.

Тепловий розрахунок парогенератора проводимо на основі рекомендації Нормативного методу з наведеними нижче уточненнями.

Екранованою поверхнею вважаємо поверхню топки, що омивається водою. Кутовий коефіцієнт екрану для стін циліндричної топки, що омиваються водою, прийнято $x=1$.

Оскільки топка цього котла має хвилясту поверхню (рис. 4), для розрахунку діаметра топки взято середнє значення діаметрів вершин та впадин хвиль D_c .

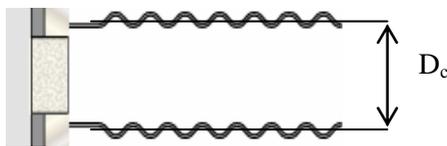


Рис. 4. Поверхня топки парогенератора

Вплив хвилястості поверхні топки має обов'язково враховуватись при визначенні інтенсивності теплообміну в топці двоходових жаротрубних котлів з реверсом газів, оскільки турбулентність газів при їх зворотному русі біля стінки суттєво підвищуватиме тепловіддачу.

Коефіцієнт ζ , що враховує зниження теплосприйняття екрану при його забрудненні, взято $\zeta=0,65$ як для настінних гладкотрубних і мембранних цільнозварних екранів в камерних топках для газоподібного палива.

Параметр M пропонується визначати на основі залежності (2), а x_r – як відношення висоти розташування пальника в топці до середнього діаметра топки.

Для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі від стінки до киплячої води використано залежність [19]:

$$\alpha = \frac{3,4 \cdot p_s^{0,18}}{1 - 0,0045 \cdot p_s} \cdot q^{2/3}, \quad (3)$$

де p_s – тиск, бар; q – питомий тепловий потік, Вт/м². Формула застосовується для діапазонів тиску від 1 до 200 бар.

Для розрахунку теплообміну від димових газів до стінки конвективної частини котла використано рекомендації наведені в [20]. Режим руху димових газів в першому та другому ходах теплообмінника турбулентний. Тому для розрахунку використано формулу Міхеєва:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_p^{0,43} \cdot (Pr_p / Pr_{wall})^{0,25} \cdot \varepsilon_1 \quad (4)$$

Оскільки відношення довжини труби до її діаметра $l/d > 50$, а саме 85,7, тому коефіцієнт $\varepsilon_1 = 1$.

Для перевірки запропонованих рішень виконані дослідження показників роботи жаротрубного горизонтального триходового парогенератора для чотирьох режимів роботи: паропродуктивність $D=4,39$ т/год, тиск пари $P_{парі} = 8,8$ бар; $D=6,36$ т/год, $P_{парі} = 9$ бар; $D=10,1$ т/год, $P_{парі} = 9,5$ бар; $D=12,1$ т/год, $P_{парі} = 8,5$ бар.

Для розрахунку температури стінки теплообмінника котла використано рекомендації, наведені нами в статті [20]. Розрахункова температура стінки з боку газів для другого ходу теплообмінника знаходиться в межах 189...205 °С, з боку парорідинної суміші 176...181 °С.

Розрахункова температура газів на виході з топки становить 888...1207 °С, на виході з другого ходу димових газів 279...416 °С, на виході з котла 204...251 °С.

Для перевірки отриманих результатів виконано їх порівняння з даними режимної карти котла. На рис. 5, показано співставлення розрахункових та експериментальних значень температури димових газів на виході з парогенератора. Розходження між значеннями розрахункової і експериментальної температури газів на виході з котла становить 4,4...7,6 %. Таке розходження пов'язано, в тому числі, із невизначеністю коефіцієнтів зниження тепловіддачі через забруднення стінки з боку газів та води.

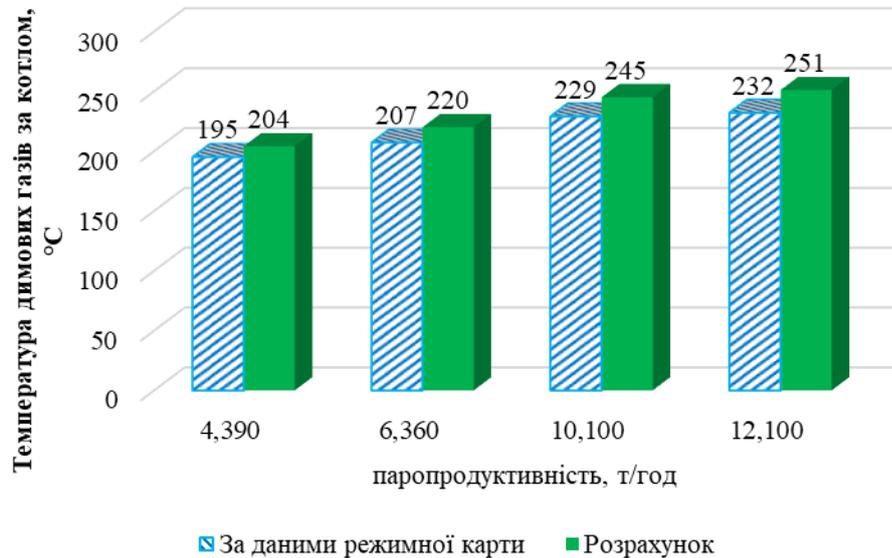


Рис. 5. Температура димових газів на виході з котла залежно від навантаження котла

За даними Bosch [21], за робочого тиску 10 бар, що відповідає температурі насиченої пари 185 °C, температура димових газів становить приблизно 245 °C, що відповідає втратам теплоти з димовими газами 11 %. Отже, отримані нами розрахункові дані по температурі відхідних газів близькі до даних режимної карти парогенератора, а також узгоджуються з даними відомих виробників жаротрубних парогенераторів.

Результати дослідження показали, що теплопередача в межах трьох ходів (для режиму $D=12,1$ т/год, $P_{\text{парі}}=8,5$ бар) розподіляється таким чином: 1 хід (камера згорання) – 40,7 %, другий хід (димогарні труби) 49,4 %, третій хід (димогарні труби) – 9,9 %, теплообмінна поверхня разом 59,3 %. Отримані розрахункові результати близькі до даних, наведених для парогенераторів Viessmann [14], де розподілення теплопередачі в парогенераторі таке: топка біля 35 %, другий і третій ходи (димогарні труби) – 65 %. Таким чином, завдяки рівномірному навантаженню всіх елементів конструкції, що омиваються водою (жарової труби, димогарних труб і розворотних камер), забезпечується високоефективне знімання тепла.

На рис. 6 показані результати дослідження, згідно яких зміна теплової напруги топкового об'єму q_v сталевого парового котла для різних навантажень складає 314...863 кВт/м³.

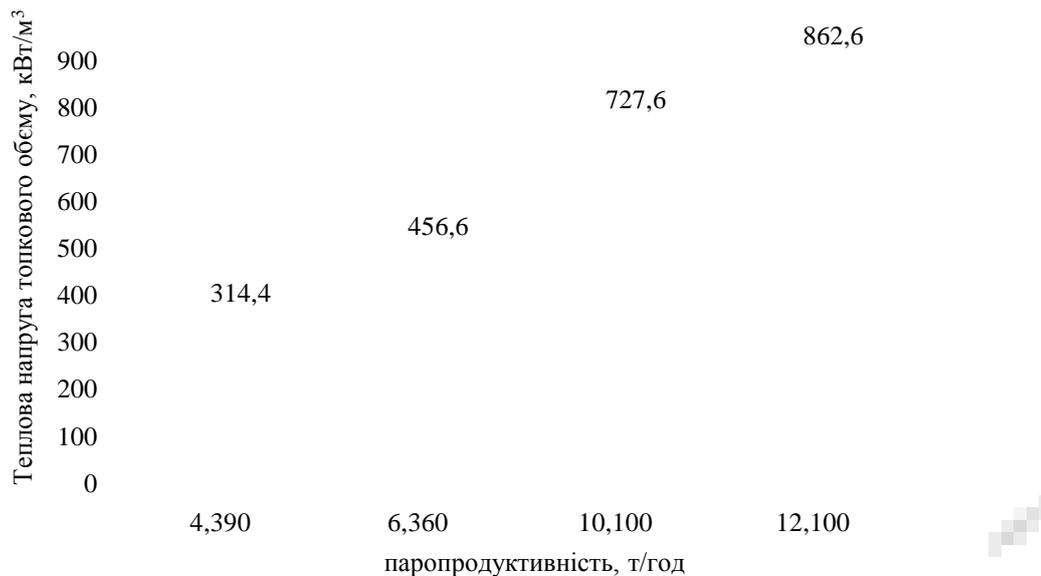


Рис. 6. Теплова напруга топкового об'єму, кВт/м³ для різних режимів роботи котла

В літературі [22] наводяться оптимальні значення q_v для топок з футеровкою 0,1...0,3 МВт/м³, для циклонних топок 3...10 МВт/м³, для сталевих котлів – до 1 МВт/м³. Виробник котлів Viessmann вказує, що теплова напруга, залежно від моделі котла повинна бути менша 1...1,2 МВт/м³. Це важливий параметр, який визначає не тільки інтенсивність теплопередачі випромінюванням, але й втрати теплоти з хімічним недопалюванням. Згідно режимної карти, втрати теплоти $q_3=0$. Це свідчить про раціональний тепловий режим роботи топки та достатню інтенсивність процесів згорання палива.

Висновки

Виконаний в статті аналіз конструктивних особливостей водотрубних і жаротрубних парових котлів показав, що жаротрубні парогенератори мають простішу, компактну та моноблочну конструкцію, значні водяний і паровий об'єми та високу експлуатаційну надійність, що робить їх доцільними для застосування в промислових системах паропостачання.

Аналіз наявної інформації показав, що наявні методи теплового розрахунку котлоагрегатів, розроблені для водотрубних котлів, можуть бути використані для горизонтальних жаротрубних парогенераторів лише з певною адаптацією до конструктивних особливостей топки.

Запропонований в статті підхід до теплового розрахунку горизонтального жаротрубного триходового парогенератора дозволив отримати розрахункові значення температур димових газів на виході з котла паропродуктивністю 12 т/год, які добре узгоджуються з даними з режимної карти. Розбіжність між розрахунковими та експериментальними значеннями температури димових газів на виході з котла не перевищує 4,4...7,6 %.

За результатами дослідження встановлено, що в широкому діапазоні навантажень близько 40,7 % теплового потоку передається у топці за рахунок випромінювання, тоді як 59,3 % теплоти сприймається у другому та третьому ходах газотрубного теплообмінника переважно конвекцією.

Виявлено, що теплова напруга топкового об'єму котла за зміни навантаження знаходиться в межах 314...863 кВт/м³, що не перевищує рекомендованих граничних значень для сталевих парових котлів. Це свідчить про раціональний тепловий режим роботи топки та достатню інтенсивність процесів згорання палива.

Отримані результати можуть бути використані для уточнення інженерних методик

теплового розрахунку горизонтальних триходових жаротрубних парових котлів, а також при проектуванні та оптимізації режимів їх експлуатації з метою підвищення енергоефективності та надійності роботи котлоагрегатів, що дозволить зменшити витрати енергоресурсів, техногенне навантаження на навколишнє середовище та дасть поштовх розвитку вітчизняного котлобудування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Vitomax HS. URL: <https://www.viessmann.ua/uk/produkt/velyki-kotly/vitomax-hs.html> (дата звернення 10.01.2026 р.).
2. Steam Boiler. URL: <https://vkkstandardkessel.de/en/steam-boiler/> (дата звернення 10.01.2026 р.).
3. Industrial steam generators. URL: https://www.garioninaval.com/en/industrial-boilers/steam-generators/?_gl=1*119410q*_up*MQ..*_ga*MTA1OTUxNDQ2OC4xNzY1OTYzNjk3*_ga_ZNQS87K263*czE3NjU5NjM2OTcKbzEkZzAkDDE3NjU5NjM3ODAKajQyJGwwJGgw (дата звернення 10.01.2026 р.).
4. Газові парові котли NAVI III S. URL: <https://navitas.ua/promyslovi-kotly/parovi-kotli/gazovi-parovi-kotli-navi-iii-s/> (дата звернення 10.01.2026 р.).
5. Universal steam boiler UL-S, UL-SX. URL: <https://www.bosch-industrial.com/global/en/ocs/commercial-industrial/universal-steam-boiler-ul-s-ul-sx-669474-p/> (дата звернення 10.01.2026 р.).
6. TRYPASS 18000 Паровий котел Unical. URL: <https://vest-m.com.ua/uk/otopleniye/parovi-kotly/parovy-kotel-vysokoho-tysku-unical-trypass-18000.html> (дата звернення 10.01.2026 р.).
7. Парові котли ICI Caldaie. URL: <https://pep.in.ua/parovi-kotli-ici-caldaie/> (дата звернення 10.01.2026 р.).
8. Eurotherm HS. URL: <https://eurokotel.com.ua/parovi-kotly/seriia:eurotherm-hs;vyrobnyk:eurotherm/> (дата звернення 10.01.2026 р.).
9. Монастирищенський завод котельного обладнання «Енергометмаш». URL: https://mzko.ua/files/EMM_catalog.pdf (дата звернення 12.01.2026 р.).
10. ТОВ «Устимівський котельно-механічний завод». URL: <https://tovukmz.com.ua/kotly/pk/pk-dkvr.html> (дата звернення 12.01.2026 р.).
11. Kolmetz Handbook of Process Equipment Design. URL: <https://www.klmttechgroup.com/PDF/EDG-SYS/ENGINEERING-DESIGN-GUIDELINES-boiler-systems-Rev1.3web.pdf> (дата звернення 12.01.2026 р.).
12. Скорочення споживання природного газу та зниження викидів шкідливих речовин з продуктами спалювання в комунальній теплоенергетиці / О. І. Сігал та ін. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. Т. 41. №2. С.54–63.
13. Конспект лекцій з дисципліни «Котельні установки промислових підприємств» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 144 – Теплоенергетика очної та заочної форм навчання / Укл. Глущенко О. Л. Кам'янське: ДДТУ, 2019. 103 с.
14. Viessmann – Technical guide steam boilers. URL: <https://www.scribd.com/document/669285650/VISSMANN-Technical-Guide-Steam-Boilers-1> (дата звернення 20.01.2026 р.).
15. Comprehensive Guide to Fire Tube Boiler and Technology Trends. URL: <https://www.epcbboiler.com/comprehensive-guide-to-fire-tube-boiler-and-technology-trends.html> (дата звернення 20.01.2026 р.).
16. Канигін О. В. Підвищення ефективності газових жаротрубних водогрійних котлів : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06 / Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2018 р. 243 с.
17. Bartosz Ciupek, Andrzej Frąckowiak. Review of Thermal Calculation Methods for Boilers – Perspectives on Thermal Optimization for Improving Ecological Parameter. *Energies*. 2024. URL: www.mdpi.com/journal/energies (дата звернення 20.01.2026 р.).
18. Гламаздин П. М., Криворук М. А., Шварценбер Р. Можливості використання нормативного методу «Тепловий розрахунок котельних агрегатів» для розрахунку жаротрубно-димогарних котлів. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2018. Вип. 27. С. 18–22.
19. Ткаченко С. Й., Степанова Н. Д. Тепломасообмін і гідродинаміка багатокомпонентних середовищ: навч. посіб. Вінниця: нац. техн. ун-т. Вінниця: ВНТУ, 2017. 109 с.
20. Залежності для теплових розрахунків жаротрубних пучків котлів малої потужності / Д. В. Степанов та ін. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2006. №2. С. 31–40.
21. Increasing combustion efficiency. URL: <https://www.boiler-planning.com/en/efficiency/increasing-combustion-efficiency/flue-gas-temperature-or-flue-gas-loss.html#:~:text=The%20flue%20gas%20temperatures%20at,product%20inside%20the%20steam%20boiler.&text=At%20an%20operating%20pressure%20of,therefore%20roughly%20245%C2%B0C>. (дата звернення 20.01.2026 р.).
22. Степанов Д. В., Корженко Є. С., Боднар Л. А. Котельні установки промислових підприємств: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2011. 120 с.

Стаття надійшла до редакції 05.02.2026.

Стаття пройшла рецензування 02.03.2026.

Боднар Лілія Анатоліївна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики,
e-mail: Bobnar06@ukr.net.

Степанов Дмитро Вікторович – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри теплоенергетики,
e-mail: stepanovdv@ukr.net.

Вінницький національний технічний університет.