

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ЖАРОТРУБНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі виконано огляд сучасних конструкцій жаротрубних парогенераторів, представлених на ринку опалювального обладнання та проведено порівняння з конструкціями водотрубних парогенераторів. Здійснено класифікацію конструктивних особливостей жаротрубних парогенераторів. Проаналізовані особливості теплового розрахунку жаротрубного парогенератора. Виявлено, що існуючі методи теплового розрахунку розроблені для водотрубних котлоагрегатів і не відповідають умовам роботи жаротрубних котлів. Запропоновані уточнення до нормативного методу теплового розрахунку котлоагрегатів, що дозволяють проводити теплові розрахунки горизонтальних жаротрубних парогенераторів. Проведене дослідження показників жаротрубного парогенератора паровидатністю 12 т/год на різних навантаженнях.

На основі розробленої математичної моделі проведено перевірний розрахунок газотрубного парогенератора. Виконано співставлення результатів моделювання з показниками роботи котла згідно режимної карти, а також даними інших авторів та виробників газотрубних парогенераторів.

Ключові слова: жаротрубний парогенератор, водотрубний парогенератор, паровидатність, температура відхідних газів, теплова напруга топкового об'єму.

Abstract

The paper reviews modern designs of fire-tube steam generators presented on the heating equipment market and compares them with designs of water-tube steam generators. Classification of design features of fire-tube steam generators is carried out. Features of thermal calculation of a fire-tube steam generator are analyzed. It is revealed that existing methods of thermal calculation are developed for water-tube boiler units and do not meet the operating conditions of fire-tube boilers. Clarifications are proposed to the normative method of thermal calculation of boiler units, which allow thermal calculations of horizontal fire-tube steam generators. A study of the indicators of a fire-tube steam generator with a steam capacity of 12 t/h at different loads was conducted.

Based on the developed mathematical model, a verification calculation of a gas-tube steam generator was carried out. Comparison of the modeling results with the boiler performance indicators according to the operating conditions map, as well as data from other authors and manufacturers of gas-tube steam generators was carried out.

Keywords: fire tube steam generator, water tube steam generator, steam capacity, exhaust gas temperature, thermal stress of the furnace volume.

Вступ

В промисловості набули широкого розповсюдження парові жаротрубні котли. На ринку опалювального обладнання України розповсюджені жаротрубні парогенератори таких закордонних виробників: Viessmann [1], StandardKessel [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 Україні в основному виготовляють водотрубні парові котли. Українські виробники, зокрема [9, 10] виробляють водотрубні парогенератори типу «Е», «ДЕ», «КЕ», «ДКВР». Ці котли належать до вертикально-водотрубних двобарабанных котлів з природною циркуляцією і призначені для вироблення насиченої водяної пари абсолютним тиском до 1,4 МПа і паропроductивністю до 25 т/год.

У минулому столітті використання жаротрубних котлів було обмежено через ряд аварій, причиною яких стали помилки при проектуванні та конструюванні. 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 [11] розроблення та впровадження сучасних вітчизняних високоефективних 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.

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

Основна частина

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); без повороту (реверсу) (триходові). По наявності охолодження задньої стінки: з охолодженням, без охолодження.

Метою розрахунку теплообміну в топці є визначення температури продуктів згорання на виході з топки при 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.

Проведено дослідження показників роботи жаротрубного горизонтального триходового парогенератора CONDOR HD-01-12. Парогенератор встановлено на одному з підприємств м. Вінниця. Парові котли CONDOR виготовляють паропродуктивністю 2,6 – 27 т/год з однією топкою.

Для розрахунку топки використано Нормативний метод теплового розрахунку котлоагрегатів з певною адаптацією до конструкції котла.

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

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.

Розходження між значеннями розрахункової і експериментальної температури газів на виході з котла становить 4,4...7,6 %.

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 [12], 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.

Зміна теплової напруги топкового об'єму q_v сталевого парового котла для різних навантажень складає 314...863 кВт/м³.

В літературі [13] 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 тепла 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 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 існуючі методи теплового розрахунку котлоагрегатів, розроблені для водотрубних котлів, можуть бути використані для горизонтальних жаротрубних парогенераторів лише з певною адаптацією, зокрема при визначенні неоднорідності температурного поля топки.

Запропонований в статті підхід до теплового розрахунку горизонтального жаротрубного триходового парогенератора дозволив отримати розрахункові значення температур димових газів на виході з котла паропроductивністю 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 %.

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 ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Vitomax HS. URL: <https://www.viessmann.ua/uk/produkt/velyki-kotly/vitomax-hs.html> (дата звернення 10.01.2026 р.)
2. SteamBoiler. URL: <https://vkkstandardkessel.de/en/steam-boiler/> (дата звернення 10.01.2026 р.)
3. Industrial steam generators. URL : https://www.garioninaival.com/en/industrial-boilers/steam-generators/?_gl=1*19410q*_up*MQ..*_ga*MTA1OTUxNDQ2OC4xNzY1OTYzNjk3*_ga_ZNQS87K263*czE3NjU5NjM2OTcjbzEkZzAkdDE3NjU5NjM3ODAKajQyJGwwJGgw (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. Сігал О.І., Падерно Д.Ю., Павлюк Н.Ю., Сафьянц А.С. та інші. Скорочення споживання природного газу та зниження викидів шкідливих речовин з продуктами спалювання в комунальній теплоенергетиці. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. Т.41. №2. С.54-63.
12. Viessmann – Technical guide steam boilers. URL: <https://www.scribd.com/document/669285650/VISSMANN-Technical-Guide-Steam-Boilers-1> (дата звернення 20.01.2026 р.)
13. Степанов Д.В., Корженко Є.С., Боднар Л.А. Котельні установки промислових підприємств: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2011. 120 с.

Боднар Лілія Анатоліївна – к.т.н., доцент кафедри теплоенергетики ВНТУ. e-mail: Bodnar06@ukr.net
Степанов Дмитро Вікторович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри теплоенергетики, e-mail: stepanovdv@ukr.net

Bodnar Lilia, Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of power engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Bodnar06@ukr.net.

Stepanov Dmytro – Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of power engineering, Head of the Department of Thermal Power Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: stepanovdv@ukr.net