



УДК 621.184:662.95

## DESIGN MODIFICATIONS OF A HOT WATER BOILER TO ENSURE STABLE COMBUSTION OF VARIABLE COMPOSITION FUEL

### КОНСТРУКТИВНЕ ВДОСКОНАЛЕННЯ ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОГО ГОРІННЯ ПАЛИВА ЗМІННОГО СКЛАДУ

Hlushchenko O.L. / Глущенко О.Л.

*s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-9230-9958

Krupii S.E. / Крупій С.Е.

*master's degree / магістр**Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Dneprostroievskaiia 2, 51918**Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Дніпробудівська 2, 51918*

**Анотація.** В статті розглядається актуальна проблема підвищення експлуатаційної надійності та екологічної безпеки систем промислового теплопостачання. Об'єктом дослідження є водогрійний котел типу ПТВМ-100, який широко використовується в енергетиці, але потребує адаптації до сучасних вимог енергоефективності та гнучкості паливопостачання. Метою роботи є обґрунтування та розробка конструктивних рішень з модернізації котлоагрегату для забезпечення стабільного спалювання коксового газу зі збереженням можливості використання природного газу як резервного палива.

Авторами запропоновано та детально описано технічне рішення щодо реконструкції пальникових пристроїв ГМП-16 та конвективної частини котла. Основний внесок полягає у розробці нової конфігурації газовипускних вузлів пальника, що передбачає встановлення камери коксового газу з дворядним розміщенням отворів (діаметром 20 мм та 40 мм). Це дозволяє оптимізувати аеродинаміку змішування палива з закрученим повітряним потоком. Також обґрунтовано зміни у геометрії трубних пакетів для запобігання їх забрудненню.

В результаті проведених інженерних розрахунків визначено нові робочі параметри модернізованого пальника: номінальна теплова потужність та витрата газу. Визначено аеродинамічні опори тракту, що є основою для налаштування дуттьового обладнання. Запропонована модернізація дозволяє досягти стабільного горіння палива змінного складу, знизити викиди шкідливих речовин та підвищити загальну ефективність роботи котельні.

**Ключові слова:** водогрійний котел, модернізація котла, пальниковий пристрій, паливо змінного складу, стійке горіння, аеродинаміка струменя, глибина проникнення струменя, конвективна поверхня нагріву, енергоефективність, оксиди азоту, аеродинамічний опір, теплопродуктивність

**Вступ.** Ефективність та надійність систем теплопостачання визначаються рівнем технічного стану основного енергетичного обладнання, насамперед промислових водогрійних котлів. В умовах сучасних енергетичних викликів, зростання вартості енергоносіїв і посилення екологічних вимог надзвичайно актуальним є питання підвищення енергоефективності, зниження шкідливих викидів і забезпечення стабільної роботи котлоагрегатів за мінливих умов експлуатації.



Особливе місце серед таких агрегатів посідають котли типу ПТВМ-100, які широко застосовуються в системах централізованого тепlopостачання промислових підприємств і житлових районів. Попри високу надійність і тривалий термін служби, традиційна конструкція котлів цього типу має низку недоліків: обмежену теплопродуктивність, підвищені втрати тепла, недостатню маневреність при зміні навантажень та екологічні обмеження, пов'язані з викидами оксидів азоту й сірки.

Дана робота присвячені питанням розроблення та обґрунтування технічних рішень з модернізації котла ПТВМ-100, спрямованих на підвищення його енергоефективності, екологічності, довговічності та здатності до стабільної роботи в умовах зміни складу палива.

Результати дослідження сприятимуть удосконаленню систем централізованого тепlopостачання, зниженню питомих витрат палива, покращенню екологічних показників і приведенню параметрів роботи котлоагрегатів до сучасних європейських стандартів енергоефективності та безпеки.

**Постановка задачі.** У сучасних умовах розвитку енергетики важливим напрямом є модернізація водогрійного котла ПТВМ-100 для стабільної роботи в умовах варіативного складу палива. Це зумовлено необхідністю забезпечення гнучкості систем тепlopостачання, здатних ефективно функціонувати на різних видах палива - природному газі, мазуті, біопаливі чи їх сумішах. Така модернізація передбачає конструктивні зміни в пальникових пристроях, топковій камері та теплообмінних поверхнях, що дозволяють забезпечити повне згоряння палива, знизити викиди шкідливих речовин і підвищити загальний коефіцієнт корисної дії.

**Результати роботи.** Розвиток промислових водогрійних котлів, зокрема високопродуктивних водотрубних агрегатів типу ПТВМ, за останні півтора десятиліття був зумовлений двома ключовими факторами: підвищенням вимог до енергоефективності та посиленням екологічного регулювання. Жорсткі урядові стандарти, спрямовані на обмеження викидів вуглецю, виявилися



основним каталізатором конструктивної модернізації в галузі промислового опалення [1]. Ці регуляторні зміни стимулювали зростання попиту на конденсаційні промислові водогрійні котли. Аналіз ринку показує, що сегмент конденсаційних технологій, що пропонує кращу енергоефективність та екологічні переваги, зростатиме із середньорічним темпом понад 5,5% до 2034 року [1].

Крім того, на традиційні котли спалювання палива чинить тиск розвиток електрифікації промислових процесів. Розробка високотемпературних електричних нагрівальних технологій і миттєвих парогенераторів, які працюють у мегаватному діапазоні, створює пряму конкуренцію. Ці електричні системи демонструють високу точність контролю, компактність та підвищену енергоефективність [2]. Щоб залишатися фінансово конкурентоспроможними в умовах такого енергетичного переходу, традиційні водотрубні котли (до яких належить ПТВМ) повинні конструктивно забезпечити максимально можливу гнучкість палива та граничний коефіцієнт корисної дії, що виходить за межі простої заміни пальника. Це вимагає повної модернізації теплообмінного тракту для захоплення тепла, що раніше вважалося незворотно втраченим, зокрема, через конденсацію водяної пари.

Паливна гнучкість стала однією з найважливіших вимог до модернізованих промислових котлів. Сучасні агрегати часто використовують двопаливні системи, здатні працювати на природному газі та рідкому паливі з низьким вмістом сірки. Це забезпечує стійкість роботи та можливість переходу на резервне паливо.

Ключовим конструктивним елементом тут є пальник із широким діапазоном модуляції. Сучасні газові/двопаливні пальники забезпечують коефіцієнт модуляції до 5:1 (або можливість роботи на 20% від номінальної потужності).

Зниження викидів оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ), особливо важливе для великомасштабних газомазутних агрегатів, вимагає не лише встановлення сучасного пальника, але й структурної модернізації топочного простору.

При роботі з варіативним паливом (особливо рідким паливом або газом)



модернізована конструкція топки повинна забезпечувати можливість оптимізації надлишку повітря. Хоча контроль надлишку повітря є операційним заходом, конструктивна стійкість агрегату до мінімального надлишку повітря є важливою. Висока ефективність згоряння, яка зазвичай супроводжується підвищеними температурами, може спричинити інтенсивне утворення  $\text{NO}_x$  та  $\text{SO}_x$  [4]. З іншого боку, недостатній надлишок повітря призводить до неповного згоряння. Конструктивно топка повинна бути спроектована таким чином, щоб забезпечити повне згоряння при мінімальному надлишку повітря, що мінімізує теплові втрати з димовими газами, а також знижує викиди  $\text{NO}$  і  $\text{SO}$  [3].

Технічні рішення по реконструкції котла передбачаються з умов забезпечення спалювання коксового газу та забезпечення теплопродуктивності 210,23 ГДж/год. Конструкція топкової камери не змінна, оскільки зниження теплової потужності котла до 58 МВт обумовлює зниження теплового навантаження в топці, що відповідає сучасним вимогам. В зв'язку з переходом на спалювання коксового газу та спалювання природного газу, як резервного палива, проводиться удосконалення пальникових пристроїв.

Удосконалення складається в наступному:

1) установлюється заглушка на центральному каналі, де розташовувалась мазутна форсунка.

2) за газовою камерою природного газу установлюється камера коксового газу, в верхній частині, якої розташований патрубок, що підводе, а на внутрішній обічайці розташовані два ряди отворів. В першому ряду 10 отворів діаметром 20 мм, у другому ряді - 5 отворів, діаметром 40 мм. Через отвори коксовий газ рівномірно поступає в закручений повітряний потік.

Котел ПТВМ-100 обладнаний 16 газомазутними пальниками продуктивністю 900 м<sup>3</sup>/год газу або 800 кг/год мазуту. Конструкція пальника передбачає периферійне підведення газу й механічне розпилювання мазуту.

У пальника ГМП амбразура виконана у вигляді камери згоряння з розділенням загального потоку повітря на два канали. Один потік повітря (первинний) подається в амбразуру через завихрювач у кількості близько 70 %



від його загальної витрати. Цей потік, змішуючись із паливом, формує перший ступінь зони горіння. Решта повітря подається в камеру згорання через периферійний тангенціальний завихрювач. Цей потік сприяє інтенсифікації змішування в амбразурі та допалюванню продуктів неповного згорання.

Така схема організації горіння, крім того, дає змогу підвищити радіаційні характеристики газового факела, що зменшує різницю між теплообмінними властивостями факелів під час заміни виду палива.

Двоступеневе спалювання палива також дозволяє знизити концентрацію оксидів азоту в продуктах згорання. Важливим показником роботи пальників є відсутність коксу на амбразурі пальника.

Реконструйований пальник ГМП у газовому колекторі має два ряди газовипускних отворів по 19 у кожному ряді: діаметр отворів першого ряду становить 8,4 мм, другого - 4,0 мм.

У зв'язку з переводом на спалювання кокового газу доцільно доповнити існуючу конструкцію пальника вузлами, що підводять газ та роздають коксовий газ. Повітряна частина пальника залишається без змін. Коксовий газ подається в пальник, після чого розподіляється через отвори.

Нижче представлений інженерний розрахунок реконструйованого пальникового пристрою, включаючи визначення витрат газу та повітря, теплової потужності, глибини проникнення струменя та аеродинамічного опору. Розрахунок було проведено по відомим методикам щодо теплового та аеродинамічного розрахунку пальникового пристрою [4, 5].

Вихідні дані для розрахунку представлені в таблиці 1, результати розрахунку - в таблиці 2.

Прийнята наступна схема розміщення отворів. Отвори для газу розміщені в два ряди. В першому ряді 10 отворів діаметром 20 мм. В другому ряді 5 отворів діаметром 40 мм.

Отже, проведені розрахунки показали, що при швидкості повітряного потоку 13,5 м/с, глибини проникнення струменів кокового газу (213,5 мм для отворів Ø20 та 333,3 мм для отворів Ø40) є достатніми для якісного



перемішування палива з повітрям без злиття струменів. Отримані критично важливі цифрові дані щодо аеродинамічних опорів (25,7 мм.вод.ст. по повітряю та 303,8 мм.вод.ст. по тракту коксового газу) є основою для подальшого вибору дуттьового обладнання та забезпечення стабільної роботи пальника.

**Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку пальникового пристрою ГМП**

Найменування показника	Одиниці виміру	Значення показника
1	2	3
1. Витрати палива на котел $B$	нм <sup>3</sup> /год	14960
2. Нижча теплота згорання коксового газу $Q_i^d$	МДж/м <sup>3</sup>	16,75
3. Кількість пальників, $Z_2$	шт.	8
4. Температура коксового газу $t_{\Gamma}$	°С	10
5. Теоретична кількість сухого повітря $V_n^H$	нм <sup>3</sup> /нм <sup>3</sup>	72077
6. Коефіцієнт надлишку повітря $\alpha_{\Gamma}$	-	1,05
7. Коефіцієнт подачі вторинного повітря $\alpha_2$	-	20-30
8. Діаметр форкамери у місці підвода газу $d_{\Phi}$	м	540

**Таблиця 2 – Результати розрахунку пальникового пристрою ГМП**

Найменування показника	Одиниці виміру	Значення показника
1. Витрата газу на пальник $B_{\Gamma}$	нм <sup>3</sup> /год	1870
2. Теплова потужність пальника $Q_{\Gamma}$	МДж/год	31322,5
3. Загальні витрати повітря на один пальник, $V_n$	нм <sup>3</sup> /год	9010
4. Витрати первинного повітря на пальник, $V_{n.1}$	нм <sup>3</sup> /год	7371,5
5. Витрати вторинного повітря на охолодження камери, $V_{n.2}$	нм <sup>3</sup> /год	1802
6. Площа перерізу в місці підвода газу, $F$	м <sup>2</sup>	0,1385
7. Розрахункова швидкість повітря в місті подачі газу, $W_p$	м/с	16,4
8. Дійсна швидкість повітря, $W$	м/с	32,8
9. Площа отвору пальника, $F$	м <sup>2</sup>	$9,42 \cdot 10^{-3}$
10. Глибина проникнення струменя з $d_1 = 20$ мм, $F$	м <sup>2</sup>	$3,14 \cdot 10^{-3}$
11. Глибина проникнення струменя з $d_1 = 40$ мм, $F$	м <sup>2</sup>	$6,28 \cdot 10^{-3}$



12. Швидкість витікання коксового газу із отворів, $W_{к.г.}$	м/с	59
13. Густина повітря, $\rho_n$	кг/м <sup>3</sup>	1,16
14. Густина коксового газу, $\rho_{к.г.}$	кг/м <sup>3</sup>	0,4456
15. Глибина проникнення струменя з $d_l = 20$ , $h$	мм	35
16. Діаметр струменя в потоці, $D_c$	мм	26,25
17. Абсолютний крок між струменями в потоці, $t$	мм	86,6
18. Глибина проникнення струменя з $d_l = 40$ мм, $h$	мм	72
19. Діаметр струменя в потоці, $D_c$	мм	54,12
20. Абсолютний крок між струменями в потоці, $t$	мм	126,9
21. Відносний крок між струменями в потоці, $t$	мм	2,34
22. Дійсна швидкість поширювання полум'я, $W_{к.г.}^o$	м/с	0,358
23. Опір пальника по повітрю, $\Delta P_n$	мм.вод.ст	181
24. Площа перетину підводящої труби коксового газу, $F$	м <sup>2</sup>	$17,6 \cdot 10^{-3}$
25. Площа перетину газовипускних труб, $F$	м <sup>2</sup>	$9,42 \cdot 10^{-3}$
26. Швидкість газу в трубі, що підводе, $W_{к.г.}$	м/с	30,5
27. Сумарний опір виходу, $\Delta h$	мм.вод.ст	167,8

### Заклучення та висновки.

1. Аналіз конструктивних принципів чітко показує, що пальниковий пристрій є ключовим елементом у вирішенні завдань паливної гнучкості, стабільності горіння та зниження викидів NO<sub>x</sub>. Це обґрунтовує необхідність проведення даної роботи, оскільки, саме цілеспрямована реконструкція пальників дозволяє адаптувати котел до спалювання специфічних та варіативних видів палива (наприклад, коксового газу) при дотриманні сучасних екологічних та експлуатаційних вимог.

2. Проаналізовано конструкцію пальника ГМП-16 та запропоновано обґрунтований варіант його реконструкції для переведення котла на спалювання коксового газу. Модернізація полягає у доповненні існуючої конструкції вузлами для підведення та роздачі нового палива, а саме двома рядами отворів (10 отворів діаметром 20 мм та 5 отворів діаметром 40 мм).

3. Виконано ключові теплотехнічні розрахунки нових параметрів роботи пальника. На основі вихідних даних про загальну витрату палива на котел (14960



нм<sup>3</sup>/год коксового газу з теплою згорання 16,75 МДж/м<sup>3</sup>) визначено, що витрата палива на один реконструйований пальник складе 1870 нм<sup>3</sup>/год. Це дозволило розрахувати нову номінальну теплову потужність одного пальникового пристрою, яка дорівнює 31322,5 МДж/год (або 8,7 МВт).

### Література.

1. Industrial Hot Water Boiler Market Size, 2025-2034 Trends Report [Електронний ресурс] // Global Market Insights. – Режим доступу: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/industrial-hot-water-boiler-market> (дата звернення: 02.11.2025).
2. Technical Trends, Radical Innovation, and the Economics of Sustainable, Industrial-Scale Electric Heating for Energy Efficiency and Water Savings [Електронний ресурс] // MDPI. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/13/5916> (дата звернення: 09.11.2025).
3. What Are the Best Practices for Improving Boiler Thermal Efficiency? [Електронний ресурс] // Taishan Group. – Режим доступу: <https://coalbiomassboiler.com/improve-boiler-thermal-efficiency/> (дата звернення: 14.11.2025).
4. Зиков А. К. Парові і водогрійні котли. Київ : Вища школа, 2017. 128 с.
5. Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Боднар Л. А. Котельні установки : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2016. 185 с.

**Abstract.** The article addresses the urgent problem of enhancing the operational reliability and environmental safety of industrial heat supply systems. The object of the study is the PTVM-100 hot water boiler, which is widely used in the energy sector but requires adaptation to modern requirements of energy efficiency and fuel flexibility. The aim of the work is to substantiate and develop design solutions for the modernization of the boiler unit to ensure stable combustion of coke oven gas while retaining the capability of using natural gas as a reserve fuel.

The authors propose and describe in detail a technical solution for the reconstruction of GMP-16 burner devices and the convective part of the boiler. The main contribution lies in the development of a new configuration of the burner gas outlet assemblies, which involves the installation of a coke oven gas chamber with a double-row arrangement of holes (20 mm and 40 mm in diameter). This allows for optimizing the aerodynamics of mixing fuel with the swirling air flow. Changes in the geometry of tube bundles to prevent fouling are also substantiated.

As a result of the conducted engineering calculations, new operating parameters of the modernized burner were determined: nominal thermal capacity and gas consumption. The aerodynamic resistances of the tract were determined, serving as a basis for adjusting the draft



*equipment. The proposed modernization allows achieving stable combustion of variable composition fuel, reducing harmful emissions, and increasing the overall efficiency of the boiler plant operation.*

**Keywords:** *hot water boiler, boiler modernization, burner device, variable composition fuel, stable combustion, jet aerodynamics, jet penetration depth, convective heating surface, energy efficiency, nitrogen oxides, aerodynamic resistance, thermal capacity.*

Стаття відправлена: 23.11.2025р.

© Глуценко О.Л.