Енергозберігаючі технології

УДК 662.951.2:697.326
DOI: 10.33070/etars.4.2021.03

Сігал І.Я., докт. техн. наук, проф., **Лавренцов Є.М.**,
Сміхула А.В., канд. техн. наук, **Марасін О.В.**, канд. техн. наук,
Домбровська Е.П., канд. техн. наук
Інститут газу Національної академії наук АН України, Київ
вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: isigal@ukr.net

Енергоефективне обладнання для модернізації газових котлів потужністю 0,1–30 МВт

Показано можливість модернізації котлів типу ТВГ-8М, ТВГ-8 та ННІСТУ-5, що експлуатуються в Україні, з приведенням їх техніко-економічних показників до сучасного європейського рівня. Розроблено проекти модернізації котлів, що полягають у заміні поверхонь нагріву в конвективних шахтах існуючих котлів без збільшення їх габаритних розмірів, з використанням конвективної частини з труб діаметром 32×3 мм та заміні палинкових пристроїв на розроблені нові подові щілинні типу МПІГ-3. Показано, що за результатами промислових впроваджень досягнуто коефіцієнти корисної дії 94–96 % котлів типу ТВГ-8М (ТВГ-8) у робочому діапазоні їх навантаження та отримано розрахунковий ККД 92–94 % для котлів ННІСТУ-5. Експериментально доведено, що при установці спеціальних каліброваних сопел-дозаторів замість просвердлених отворів у колекторах газових палиників вдається утримувати геометрію сопла (витрату природного газу палиником у залежності від тиску) незмінною протягом усього терміну експлуатації. Показано технічну можливість спалювання в подових щілинних дифузійних палиниках типу МПІГ-3 також біогазу та сумішей природного газу з воднем при заміні лише соплового апарату. *Бібл. 17, рис. 6, табл. 1.*

Ключові слова: котли, горіння, оксиди азоту, енергоефективність.

В Україні експлуатується близько 45 тис. котлів потужності 0,1–30 МВт з техніко-економічними та екологічними показниками, що не відповідають сучасному європейському рівню, причому переважна більшість з них відпрацювала

свій заводський ресурс [1, 2]. Наприклад, у системах теплопостачання міст, селищ та підприємств України експлуатуються на природному газі такі типи низькоефективних водогрійних котлів: Надточій, Стреля, Стребеля, НРЧ, Мінськ-1,

Універсал, ННІСТУ та інші потужністю 0,1–1 МВт, ККД яких складає 76–85 %. З котлів середньої потужності 0,1–30 МВт найбільш розповсюдженими в Україні є запатентовані Інститутом газу НАН України та розроблені спільно з Укрдипроенерго Міненерго України, Монастирищенським машинобудівним заводом (виробником котлів), ВНИИАМ (Всесоюзний науково-дослідний інститут атомного машинобудування СРСР) у 1960–1980-х рр. котли типу ТВГ-4, ТВГ-8, ТВГ-4Р, ТВГ-8М, КВГ-4,65, КВГ-7,56 [3–5].

На час їх проектування було закладено оптимальний розрахунковий ККД котлів на номінальному навантаженні в діапазоні 90–92 %. Це рішення обґрунтовувалося тим, що втрата додаткової кількості теплової енергії, яка б отримувалася за розрахунковий час експлуатації (при ціні природного газу в СРСР на момент проектування), визнана економічно більш прийнятною у порівнянні з вартістю капітальних витрат, які треба було здійснити відразу, зокрема у частині збільшення використання безшовних труб для виготовлення конвективної частини. Наприклад, базова модель котлоагрегату ТВГ-8 згодом була модернізована до ТВГ-8М, причому мета модернізації полягала у зменшенні маси труб конвективної частини на близько 23 % (площа нової конвективної поверхні склала 109,6 м² замість 141,9 м²), проте ККД при цьому також зменшився на більш 1 % (детальніше див. табл. 1 у наступному розділі). Вищевказаний ККД неодноразово підтверджувався на приймальних та звичайних пуско-налагоджувальних випробуваннях [4–6]. Однак, на сьогодні середній ККД для котлів неконденсаційного типу, доступних на європейському ринку, потужністю більш 0,1 МВт, складає 94–96 %.

На рис. 1 наведена орієнтовна встановлена номінальна вхідна (питома кількість теплової енергії, що виділяється під час горіння палива; визначення терміну у [7]) потужність котлів 0,1–30 МВт за основними типами, які експлуатуються в Україні на природному газі.

Зважаючи на те, що переважна більшість котлоагрегатів, вказаних на рис. 1, були встановлені більш 30 років тому, тобто відпрацювали свій призначений заводський ресурс, існує потреба в їх модернізації (або заміні) з приведенням техніко-економічних та екологічних показників до сучасного європейського рівня, насамперед котлів, які мають найбільшу встановлену теплову потужність: типів ТВГ, КВГ, ННІСТУ та ін.

Рис. 1. Типи котлоагрегатів вхідної потужності 0,1–30 МВт, що експлуатуються в Україні на природному газі, та їх орієнтовна встановлена (вхідна) теплова потужність (кількість одиниць вказана на рисунку поряд).

Fig. 1. Types of boilers with an input capacity of 0.1–30 MW, operated in Ukraine on natural gas and their approximate installed (input) heat capacity (the number of units is shown in the figure next to it).

Шляхи підвищення теплотехнічних та економічних показників котлів

В Україні заміна котлоагрегатів потужністю 0,1–30 МВт та вище, що відпрацювали свій заводський ресурс, є складною задачею через, перш за все, обмеженість джерел капітальних видатків. У той же час котли (пальники, конвективні поверхні, теплоізоляція тощо), допоміжне обладнання котельних та самі котельні проходять необхідні чергові капітальні ремонти з реконструкцією або заміною відповідних елементів на аналогічні. Економічно обґрунтовано замість частини капітальних ремонтів провести модернізацію обладнання з приведенням техніко-економічних показників котлів до сучасного європейського рівня.

Так, підвищення ефективності роботи котлоагрегатів можливе за рахунок зменшення основних втрат, які здійснюються під час їх роботи [8]:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100 \%, \quad (1)$$

де q_1 — корисно використана теплова енергія; q_2 – q_6 — втрати теплової енергії: q_2 — з вихідними газами, q_3 — від хімічної неповноти згорання; q_4 — від механічної неповноти згорання; q_5 — через зовнішню поверхню; q_6 — з теплом шлаку.

Втрати теплової енергії q_4 та q_6 при спалюванні природного газу відсутні, а q_3 жорстко регулюється екологічними нормами та становить менш 0,05 %, хоча при проектуванні котлів допускається не більш 0,15 %, тобто необхідно зменшувати втрати q_2 та q_5 [8].

На рис. 2 наведені теплові втрати реальних котлів деяких найбільш розповсюджених в Україні конструкцій теплової потужності 0,1–30 МВт, які працюють на природному газі.

Одним із способів зменшення втрат теплової енергії з димовими газами для існуючих котлів є застосування виносних теплоутилізаторів, які можуть бути встановлені за котлами, зокрема конденсаційного типу [9]. Незважаючи на певні вагомні переваги такого способу підвищення ефективності використання теплової енергії, наприклад, не втручання у конструкцію котла та можливість відібрати більше теплової енергії від димових газів, він має суттєві недоліки. Так, у переважній більшості випадків у приміщеннях котельних за котлами недостатньо вільного місця для розміщення теплоутилізаторів. Їх розміщення за межами котельні може призвести до обмерзання та пошкодження (у тому числі призначених для підігріву повітря), а побудова спеціального приміщення не завжди можлива та економічно доцільна. Також можуть виникнути проблеми через недостатність існуючої потужності тягодуттєвого обладнання.

Рис. 2. Теплові втрати деяких найбільш розповсюджених в Україні конструкцій реальних котлів.

Fig. 2. Heat losses of some of the most common in Ukraine designs of real boilers.

Більш раціональним способом є заміна поверхонь нагріву конвективних шахт існуючих котлів (особливо водогрійних) без збільшення їх габаритних розмірів (або при незначній їх зміні), а також заміна палиникових пристроїв на сучасні. Вказані роботи можливо провести безпосередньо під час проведення чергових капітальних ремонтів котлів з приведенням їх техніко-економічних та екологічних показників до рівня нових сучасних котлів, які доступні на ринку.

Конструкція котлоагрегатів типорозмірів ТВГ та КВГ завдяки застосуванню двосвітних екранів та подових палиників забезпечує інтенсифікацію теплообміну, зниження викидів оксидів азоту до значень відповідно до директиви ЄС для діючих котлів, при цьому підтверджений фізичний ресурс котлів складає більш 40 років [6, 10, 11]. Разом з тим економічно обґрунтованим та можливим є підвищення ККД цих котлів до 94–96 % у робочому діапазоні їх навантаження за рахунок модернізації існуючої конвективної частини (із збільшенням площі її поверхні) та удосконалення палиникових пристроїв.

Існуючі котли типу НИИСТУ (найбільшою є кількість НИИСТУ-5), фактично обладнані лише топкою без конвективної частини (присутнє лише вертикальне пластинчасте оребрення із зовнішньої сторони топкових екранних труб, виконане зварюванням). Котли були спроектовані для спалювання твердого палива на колосниковій решітці, але на момент розвалу СРСР більшість їх була переведена на спалювання природного газу з установкою трьох подових форкамерних палиників замість колосників та у такому варіанті вже випускалися промисловістю.

Ще з 1988 р. приймалися спроби законодавчо заборонити випуск цих котлів як малоефективних, але вони випускаються і зараз, оскільки мають просту конструкцію та високу ремонтпридатність, а їх ремонт може бути виконаний власними силами практично будь-якого підприємства. Принципова конструкція котла дає можливість здійснити його модернізацію з установкою додаткової конвективної поверхні нагріву з метою зниження температури димових газів, що йдуть у димар, удосконалити теплову ізоляцію котла та замінити палиникові пристрої на більш сучасні, що часто працюють з коефіцієнтами надлишку повітря $\alpha > 1,4$, особливо на середніх навантаженнях. Такі проекти вже відомі, але на номінальному навантаженні досягнуто ККД лише

Таблиця 1. Результати випробувань базових котлів ТВГ-8М, ТВГ-8 та модернізованих ТВГ-8М
Table 1. Test results of basic boilers TVH-8M, TVH-8 and modernized TVH-8M

Параметр	ТВГ-8М*	ТВГ-8**	ТВГ-8М після модернізації***	
Навантаження котла (Q_k/Q_n), 100, %	92	98	99	96
Теплопродуктивність, Гкал/год	7,62	7,88	8,25	7,95
Витрата газу на котел, м ³ /год	1034	1078	1056	1025
Калорійність газу Q^{***} , ккал/м ³	8176	8000	8274	8218
Витрата води через котел G, т/год	98	134	104	116
Температура води на вході в котел $t_{вх}$, °C	50	46	52	45
Температура води на виході з котла $t_{вих}$, °C	128	105	131	114
Гідрравлічний опір ΔP_k , кг/см ²	3,3	2,3	2,5	2,6
Температура вихідних газів $t_{дг}$, °C	187	176	117	108
Коефіцієнт надлишку повітря	1,36	1,25	1,20	1,27
Втрата теплоти в оточуюче середовище q_5 , %	0,81	0,75	0,75	0,78
Втрата теплоти з димовими газами q_2 , %	9,09	7,93	4,88	4,76
Аеродинамічний опір ΔH , кг/м ²	85,5	118,5	91	97,5
NO _x , мг/нм ³ (3 % O ₂)	171	173	198	176
CO, мг/нм ³ (3 % O ₂)	46	69	21	6
Площа конвективної поверхні, м ²	109,6	141,9	160,3	160,3
Діаметр труби конвективної поверхні, мм	28 × 3	28 × 3	32 × 3	32 × 3
ККД котла, %	90,1	91,3	94,4	94,5

* Київ, р/к Депутатська, 2, ст. № 1; ** Київ, р/к Попова, 4, ст. № 3; *** стовпчик 4, Київ, р/к Святошин, ст. № 1; стовпчик 5, Київ, р/к Сирець-1, ст. № 1; **** $t = 20$ °C, $p = 101,325$ кПа [13].

91,6 %, причому разом із заміною теплової ізоляції котла (для зменшення втрат q_5) [12].

Зауважимо, що при модернізації можливо збільшити ККД котлів навіть вище 94–96 %, але при їх роботі, особливо у системах централізованого теплопостачання, у кожному конкретному випадку буде потрібно техніко-економічне обґрунтування додаткових капітальних витрат щодо застосування спеціальних корозійностійких матеріалів в останніх по ходу газів конвективних поверхнях котлів (або застосування насосів рециркуляції), захисту боровів, димососу та димової труби від підкисленого конденсату, його збору та утилізації.

Дослідження та випробування обладнання для модернізації котлів

Для котлів ТВГ-8 та ТВГ-8М проведено розробку проекту їх модернізації (один проект модернізації для обох типів котлів), що полягає у заміні конвективної частини котлів з труби діаметром 28 × 3 мм на трубу діаметром 32 × 3 мм та у модернізації існуючих заводських щільних подових палинкових пристроїв до типу МПИГ-3 [6]. Попередні розрахунки та ескізні проекти модернізації виконані також для котлів КВГ-7,56, ТВГ-4р, КВГ-4,65.

У табл. 1 наведені основні дані випробувань базових конструкцій котлів ТВГ-8М, ТВГ-8 та після модернізації 2-х котлів ТВГ-8М на максималь-

ній теплопродуктивності, з новою конвективною поверхнею нагріву з труби діаметром 32 × 3 мм та палинковими пристроями типу МПИГ-3 (за такою схемою на даний час модернізовано ряд котлів ПАТ «Київенерго» СВП «Київські теплові мережі»).

На рис. 3 наведено залежність ККД (η) котлів ТВГ-8, ТВГ-8М та модернізованих ТВГ-8М від навантаження.

Рис. 3. Залежність ККД (η) базових котлів ТВГ-8, ТВГ-8М та модернізованих ТВГ-8М від навантаження (котли відповідають табл. 1).

Fig. 3. Dependence of efficiency (η) of basic boilers TVH-8, TVH-8M and modernized TVH-8M on load (boilers correspond to Table 1).

Рис. 4. Модернізований котел ННІСТУ-5 з використанням додаткової конвективної поверхні нагріву з труби діаметром 32×3 мм: а — конвективна частина; б — пальник МПІГ-3н; с — топкова поверхня нагріву; 1 — вхід зворотної води; 2 — перегородка; 3 — труби діаметром 32×3 мм конвективної частини; 4 — вихід води; 5 — сопловий апарат пальника; 6 — вогнестійкий тунель; 7 — розподільник повітря; 8 — раптове розширення.

Fig. 4. Modernized boiler NYYSTU-5 with using an additional convective heating surface from a pipe $\varnothing 32 \times 3$ mm: а — convective part; б — burner МПІГ-3н; с — furnace heating surface; 1 — return water inlet; 2 — partition; 3 — pipes $\varnothing 32 \times 3$ mm of the convective part; 4 — water output; 5 — nozzle burner apparatus; 6 — fire-resistant tunnel; 7 — air distributor; 8 — sudden expansion.

Рис. 5. Залежність ККД котла ННІСТУ-5 від потужності: I — у заводській комплектації; II — з використанням додаткової конвективної поверхні з труби діаметром 57×3 мм, $F_{\text{конв}} = 35,7 \text{ м}^2$; III — те саме з діаметром 32×3 мм, $F_{\text{конв}} = 34,6 \text{ м}^2$ (розрахунок).

Fig. 5. Dependence of boiler efficiency NYYSTU-5 on power: in the factory configuration (I), using an additional convective surface of the pipe $\varnothing 57 \times 3$ mm, $F_{\text{conv}} = 35,7 \text{ м}^2$ (II) and $\varnothing 32 \times 3$ mm, $F_{\text{conv}} = 34,6 \text{ м}^2$ (calculation) (III).

Обґрунтовані, запатентовані та частково впроваджені проекти модернізації котлів типу ННІСТУ-5, що полягають в установці додаткової конвективної поверхні нагріву, виготовленої з труб діаметром $57 \times 3,5$ мм, $51 \times 2,5$ мм [12] та по удосконаленому проекту з труби діаметром 32×3 мм [14], в існуючу конвективну шахту (обмурівка якої перед встановленням поверхні розбирається з одночасним демонтажем неефективного оребрення зовнішньої сторони топкових екранних труб) та у заміні пальників. Так, наприклад, у топці котла ННІСТУ-5 встановлюються два нових розроблених дифузійних щільних подових пальники з газовими колекторами діаметром $57 \times 3,5$ мм, або один діаметром $76 \times 3,5$ мм типу МПІГ-3н (низького тиску) замість існуючих трьох форкамерних, що дає можливість зменшити коефіцієнт надлишку повітря у топці до рівня $\alpha = 1,2-1,25$ (рис. 4).

На рис. 5 наведено залежність ККД котлоагрегатів базового котла ННІСТУ-5 та модернізованих з використанням додаткової конвективної поверхні з труби діаметром 57×3 мм, площею $F_{\text{конв}} = 35,7 \text{ м}^2$ [12] та з труби діаметром 32×3 мм, площею $F_{\text{конв}} = 34,6 \text{ м}^2$ (розрахунок). При цьому

швидкість газів у конвективному пакеті розраховується за формулою [8]:

$$w_r = B_r \cdot V_r^n (v + 273) / (273 \cdot F_r), \quad (2)$$

де B_r — витрата природного газу, $\text{м}^3/\text{с}$; V_r^n — об'єм димових газів, $\text{м}^3/\text{м}^3$; v — середня температура димових газів, $^{\circ}\text{C}$; F_r — живий перетин для проходу газів, м^2 .

При використанні труби діаметром 32×3 мм для виготовлення конвективної частини котла ННІСТУ-5 живий перетин для проходу газів є меншим ($0,088 \text{ м}^2$ у порівнянні з $0,111 \text{ м}^2$ при використанні труби діаметром 57×3 мм), тобто швидкість димових газів збільшується. Крім того, ліквідований газохід у задній частині топки. Тепер усі продукти згоряння, об'єм яких збільшується на третину, йдуть через бокові газоходи, де встановлено додаткову конвективну частину (у лівому та правому газоходах), що ще збільшує швидкість димових газів, відповідно коефіцієнт теплопередачі та ККД котла. Проведений розрахунок показує, що швидкість димових газів стала на понад 40 % вище, $w_r = 5,6 \text{ м/с}$ та коефіцієнт теплопередачі майже у 2 рази вище — $k = 57 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, що забезпечує більшу передачу теплової енергії середовищу, що нагрівається.

На рис. 6 наведено результати дослідження залежності утворення та викидів NO_x у котлах ННІСТУ-5, що встановлені в котельні м. Київ, к/к Крамського, 16, ст. № 5, при використанні трьох форкамерних пальників та двох щільних подових типу МПІГ-Зн, що встановлені у військовому санаторії «Пуща-Водиця» м. Києва, ст. № 3. За отриманими результатами можна констатувати незначне зменшення утворення та викидів оксидів азоту, що можна пояснити тим, що пальник МПІГ-Зн дифузійного типу на відміну від існуючих форкамерних, які є різновидом інжекційних.

Особливості нових технічних рішень, які застосовані у подових пальникових пристроях типу МПІГ-Зн, ґрунтуються, зокрема, на установці спеціальних каліброваних сопел-дозаторів замість просвердлених отворів у колекторі [15]. Це дає можливість утримувати геометрію сопла (витрату природного газу пальником у залежності від тиску) незмінною під час усього терміну експлуатації.

Встановлено, що просвердлені отвори у колекторі-трубі з часом за рахунок деформації металу чи прогоряння змінюють площу прохідного пере-

Рис. 6. Залежність утворення оксидів азоту в котлі ННІСТУ-5 від типу пальників: f — форкамерні; b — щільні подові типу МПІГ-Зн.

Fig. 6. Dependence of formation of nitrogen oxides in the boiler NYYSTU-5 on the type of burners: f — burner with frequent pre-mixing; b — slot bottom burner type MPIG-3n.

тину, що призводить до розбалансування співвідношення повітря : паливо, тобто коефіцієнта надлишку повітря (α). Ще однією перевагою застосування подового щільного пальника типу МПІГ-З є технічна можливість (у разі якщо газовий колектор виконаний з корозійностійкої сталі) лише заміною сопел на спеціалізовані, які адаптовані для біогазу, отримати пальник, що може працювати виключно на біогазі [15]. Тобто котли типу ТВГ, КВГ та ННІСТУ з подовими пальниками типу МПІГ-З можуть з незначними витратами бути переобладнані на спалювання біогазу.

У світі також швидко розвивається сектор водневої енергетики, проводяться дослідження щодо спалювання сумішей природного газу та водню [16, 17]. Зважаючи, що подові щільні пальники типу МПІГ-З дифузійного типу, вони можуть бути використані для спалювання сумішей природного газу та водню.

Висновки

В Україні експлуатується близько 45 тис. котлів потужністю $0,1\text{--}30 \text{ МВт}$ з техніко-економічними та екологічними показниками, що не відповідають сучасному європейському рівню, причому переважна більшість з них відпрацювала свій заводський ресурс. Найбільшу встановлену теплову потужність мають котли типів ТВГ, КВГ,

НИИСТУ та ДКВР.

Розроблені проекти модернізації котлів типів ТВГ-8, ТВГ-8М та НИИСТУ-5, що полягають в заміні конвективної частини котлів з використанням труби діаметром 32 × 3 мм та існуючих пальникових пристроїв на дифузійні щільніні подові типу МПИГ-3. При цьому вдалося досягти ККД котлів типу ТВГ-8М (ТВГ-8) 94–96 % у робочому діапазоні їх навантаження, щодо котлів НИИСТУ-5 отримано розрахунковий ККД 92–94 %.

Показана технічна можливість спалювання у подових щільніних дифузійних пальниках типу МПИГ-3 природного газу, біогазу (якщо газовий колектор виконано з корозійностійкої сталі) та сумішей природного газу та водню при заміні лише соплового апарату.

Список літератури

1. Сміхула А.В., Сігал І.Я., Бондаренко Б.І., Семенюк Н.І. Технології зниження шкідливих викидів до атмосфери тепловими електростанціями та котельними великої і середньої потужності України. Київ : ФОП Маслаков, 2019. 108 с.
2. Роддатис К.Ф., Полтарецький А.Н. Справочник по котельным установкам малой производительности. М. : Энергоатомиздат, 1989. 488 с.
3. А.с. 173396 СССР, МПК F 24 D. Водогрейный котел. Сігал І.Я., Лавренцов Е.М., Домбровская Э.П.; № 925898/24-6; заявл. 21.10.1964; опубл. 07.04.1965, Бюл. № 15.
4. Сігал І.Я., Лавренцов Е.М., Косинов О.И., Домбровская Э.П. Газовые водогрейные промышленно-отопительные котлы. Киев : Техника, 1967. 145 с.
5. Сігал І.Я., Лавренцов Е.М. Газовые теплофикационные промышленно-отопительные водогрейные котлы. *Энергетика и электрификация*. 1967. № 2. С. 10–12.
6. Лавренцов Є.М., Сігал І.Я., Сміхула А.В., Домбровська Е.П., Кернажицька О.С., Марасін А.В. Досвід розробки, впровадження та модернізації водогрійних котлоагрегатів з двосвітними екранами та щільніними подовими пальниками. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2019. № 3. С. 17–26. — <https://doi.org/10.33070/etars.3.2019.02>
7. Про затвердження технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин із теплових установок, номінальна теплова потужність яких перевищує 50 МВт : Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 22.10.2008 р. № 541. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1110-08>
8. Тепловой расчет котлов: Нормативный метод. Санкт-Петербург : НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.
9. Современные технологии глубокого охлаждения продуктов сгорания топлива в котельных установках, их проблемы и пути решения / Под ред. А.В.Ефимова. Харьков : НТУ «ХПИ», 2017. 233 с.
10. Сігал І.Я., Сміхула А.В., Сігал А.И. Опыт разработки горелочных устройств, топочных камер и технологий снижения выбросов оксидов азота при сжигании природного газа в котельных агрегатах. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2019. № 3. С. 70–79. — <https://doi.org/10.33070/etars.3.2019.07>
11. Directive (EU) 2015/2193 (2015). Of the European parliament and of the council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants. *Official Journal of the European Union*, 2015, 28 Nov., 19 p.
12. Сігал І.Я., Лавренцов Е.М., Сігал А.И., Кучин Г.П., Скрипко В.Я., Быкорез Е.И. Модернизация водогрейных отопительных котлов мощностью до 1 МВт. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2010. № 2. С. 19–23.
13. ГОСТ 2939-63. Газы. Условия для определения объема. Введ. 01.01.64. М.: Издательство стандартов, 1988.
14. Пат. на винахід UA 111265 Укр., МПК F 24 H 1/12. Прямоточний водогрійний котел на газовому паливі. Лавренцов Е.М.; № а201409476; заяв. 28.08.2014; опубл. 11.04.2016, Бюл. № 7.
15. Сігал І.Я., Сміхула А.В., Сігал О.І., Марасін О.В. Дослідження горіння відірваних газових струменів при стабілізації фронту полум'я на вертикальній поверхні. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2020. № 4. С. 29–38. — <https://doi.org/10.33070/etars.4.2020.03>
16. Карп І.М. Водень в електро- та транспортній енергетиці. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 1. С. 64–70. — <https://doi.org/10.15407/techne2020.01.064>
17. Gersena S., Slima B., Zeijlmakera R., Van Es-sena M., Tichelaar R. The Development of a Natural Gas/Hydrogen Boiler System. *The International Gas Union Research Conference*, Muscat, Oman, 24–26 Feb., 2020, P. 1–8. — https://www.researchgate.net/publication/339899796_The_Development_of_a_Natural_GasHydrogen_Boiler_System

Надійшла до редакції 02.12.2021

Сигал И.Я., докт. техн. наук, проф., **Лавренцов Е.М.,**
Смихула А.В., канд. техн. наук, **Марасин А.В.,** канд. техн. наук,
Домбровская Э.П., канд. техн. наук
Институт газа Национальной академии наук Украины, Киев
ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: isigal@ukr.net

Энергоэффективное оборудование для модернизации газовых котлов мощностью 0,1–30 МВт

Показана возможность модернизации котлов типа ТВГ-8М, ТВГ-8 и НИИСТУ-5, эксплуатируемых в Украине, с приведением их технико-экономических показателей к современному европейскому уровню. Разработаны проекты модернизации котлов, заключающиеся в замене поверхностей нагрева в конвективных шахтах существующих котлов без увеличения их габаритных размеров, с использованием конвективной части из труб диаметром 32×3 мм и замене горелочных устройств разработанными новыми щелевыми типа МПИГ-3. Показано, что по результатам промышленных внедрений достигнуты коэффициенты полезного действия 94–96 % для котлов типа ТВГ-8М (ТВГ-8) в рабочем диапазоне их нагрузки и получен расчетный КПД 92–94 % для котлов НИИСТУ-5. Экспериментально доказано, что при установке специальных калиброванных сопел-дозаторов вместо просверленных отверстий в коллекторах газовых горелок удается удерживать геометрию сопла (расход природного газа горелкой в зависимости от давления) неизменной на протяжении всего срока эксплуатации. Показана техническая возможность сжигания в подовых щелевых диффузионных горелках типа МПИГ-3 также биогаза и смесей природного газа с водородом при замене только соплового аппарата. *Библ. 17, рис. 6, табл. 1.*

Ключевые слова: котлы, горение, оксиды азота, энергоэффективность.

Sigal I.Ya., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Lavrentsov E.M., Smikhula A.V., Candidate of Technical Sciences,
Marasin O.V., Candidate of Technical Sciences,
Dombrowska E.P., Candidate of Technical Sciences
The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv
39, Dehtiarivska Str., 03113 Kyiv, Ukraine, e-mail: isigal@ukr.net

Energy Efficient Equipment for Modernization of the Gas Boilers Power 0.1...30 MW

The possibility of modernization of boilers TVH-8M, TVH-8 and NYYSTU-5, operated in Ukraine, with the increasing of their technical and economic indicators to the modern European level is shown. Projects of modernization of boilers have been developed, which consist in redesign of heating surfaces in convective shafts of existing boilers without increasing their overall dimensions with using convective part of pipes $\varnothing 32 \times 3$ mm and replacement of burner devices by developed new type MPIG-3. It is shown that the results of industrial implementations achieved efficiency of boilers type TVH-8M (TVH-8) 94–96 % in the operating range

of their load and obtained the calculated efficiency for boilers NYYSTU-5 92–94 %. It is experimentally proven that when installing special calibrated nozzle, instead of drilled holes in the collectors of gas burners, it is possible to keep the nozzle geometry (natural gas burner consumption depending on pressure) unchanged throughout the service life. The technical possibility of combustion of biogas and mixtures of natural gas and hydrogen in the slot bottom diffusion burners of the MPIG-3 type, when replacing only the nozzle apparatus is shown. *Bibl. 17, Fig. 6, Table 1.*

Keywords: boilers, combustion, resource, nitrogen oxides, energy efficiency.

References

1. Smikhula A.V., Sigal I.Ya., Bondarenko B.I., Semeniuk N.I. [Technologies for reduction of harmful emissions to the atmosphere of thermal power plants and boiler-houses of large and medium power of Ukraine]. Kyiv: FOP Maslakov, 108 p. (Ukr.)
2. Roddatis K.F., Poltaretsky A.N. [Handbook on boiler plants of low productivity]. Moscow : Energoatomizdat, 1989. 488 p. (Rus.)
3. [Certificate of authorship 173396 USSR, MPK F 24 D. Vodohreynnyy kotel]. Sigal I.Ya., Lavrentsov E.M., Dombrowska E.P.; № 925898/24-6; Zajav. 21.10.1964; Publ. 07.04.1965, Bull. 15. (Rus.)
4. Sigal I.Ya., Lavrentsov E.M., Kosinov O.I., Dombrowskaya E.P. Gazovyye vodogreynnye promyshlennootopitelnyye kotly. Kyiv : Tekhnika, 1967. 145 p. (Rus.)
5. Sigal I.Ya., Lavrentsov E.M. Gazovyye teplofikatsionnyye promyshlennootopitelnyye vodogreynnye kotly. *Energetika i elektrifikatsiya*. 1967. No. 2. pp. 10–12. (Rus.)
6. Lavrentsov E.M., Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Dombrowska E.P., Kernazhytska E.S., Marasin O.V. [Experience of development, implementation and modernization of hot water supply boilers with dual-screens and the slot bottom burners]. *Energotehnologii i resyrsosberejenie. [Energy Technologies & Resource Saving]*. 2019. No. 3. pp. 17–26. — <https://doi.org/10.33070/etars.3.2019.02> (Ukr.)
7. [On approval of technological standards of permissible emissions of pollutants from thermal power plants with a nominal thermal capacity exceeding 50 MW : Order of the Ministry of Environmental Protection of Ukraine dated 22.10.2008 № 541]. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1110-08> (Ukr.)
8. [Thermal calculation of boilers : Standard method]. Sankt-Peterburg : NPO CKTI, 1998. 256 p. (Rus.)
9. [Modern technologies for deep cooling of fuel combustion products in boiler plants, their problems and solutions]. Ed. A.V.Efimov. Kharkiv : NTU «KhPI», 2017. 233 p. (Rus.)
10. Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Sigal O.I. [Experience of development burners, furnaces chambers, and technologies for reducing emissions of nitrogen oxides by boilers during the combustion of natural gas]. *Energotehnologii i resyrsosberejenie. [Energy Technologies & Resource Saving]*. 2019. No. 3. pp. 70–79. — <https://doi.org/10.33070/etars.3.2019.07> (Rus.)
11. Directive (EU) 2015/2193 (2015). Of the European parliament and of the council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants. *Official Journal of the European Union*. 2015. 28 Nov., 19 p.
12. Sigal I.Ya., Lavrentsov E.M., Sigal A.I., Kuchin G.P., Skripko V.Ya., Bykorez E.I. Reconstruction and Modernization of Water-Heating and Steam Boilers in Heat-Systems. *Energotehnologii i resyrsosberejenie. [Energy Technologies & Resource Saving]*. 2010. No. 2. pp. 19–23. (Rus.)
13. GOST 2939-63. [Gases. Conditions for determining the volume]. Moscow : Publishing house of standards, 1988. (Rus.)
14. Patent of Ukraine for the invention UA 111265, IPC F 24 H 1/12. Pryamotochnyy vodohriynnyy kotel na hazovomu palyvi. Lavrentsov E.M.; № a201409476; application 28.08.2014; publ. 11.04.2016, Bull. № 7. (Ukr.)
15. Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Sigal O.I., Marasin O.V. [Combustion research of impinging gas jets at stabilization of the flame front on a vertical surface]. *Energotehnologii i resyrsosberejenie. [Energy Technologies & Resource Saving]*. 2020. No. 4. pp. 29–38. — <https://doi.org/10.33070/etars.4.2020.03> (Ukr.)
16. Karp I.M. [Hydrogen in electric and transport power engineering]. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. No. 1. pp. 64–70. — <https://doi.org/10.15407/techned2020.01.064> (Ukr.)
17. Gersena S., Slima B., Zeijlmakera R., Van Es-sena M., Tichelaar R. The Development of a Natural Gas/Hydrogen Boiler System. *The International Gas Union Research Conference*, Muscat, Oman, 24–26 Feb., 2020, P. 1–8. — https://www.researchgate.net/publication/339899796_The_Development_of_a_Natural_GasHydrogen_Boiler_System

Received December 2, 2021