

Технічні науки

УДК 538.9:536.6

Фіалко Наталія Михайлівна

*доктор технічних наук, професор
член-кореспондент НАН України, завідувача відділу
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Fialko Nataliia

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Corresponding Member NAS of Ukraine, Head Department
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Навродська Раїса Олександрівна

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Navrodska Raisa

*Candidate of Technical Sciences, Senior Scientific Researcher,
Leading Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Шевчук Світлана Іванівна

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Shevchuk Svitlana

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Гнедаш Георгій Олександрович

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Gnedash Georgii

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**ТЕПЛОВА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОПАЛЮВАЛЬНИХ КОТЕЛЬНИХ
УСТАНОВОК З РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ ДИМОВИХ ГАЗІВ
THERMAL EFFICIENCY OF HEATING BOILER UNITS WITH
EXHAUST GAS RECIRCULATION**

Анотація. *Наводяться результати досліджень для водогрійного котла теплопродуктивністю 2МВт його основних теплових показників при застосуванні способу рециркуляції відхідних газів у дуттьове повітря. Дослідження виконувались за різних режимів експлуатації котла протягом опалювального періоду при зміні його теплового навантаження від 30 до 100% та за різних часток рециркульованих газів (від 10 до 20%) у суміші з дуттьовим повітрям. Показано, що застосування рециркуляції димових газів у розглянутий спосіб призводить до зменшення ККД котла на 1,3 – 3,1%.*

Ключові слова: *газоспоживальні котли, параметри системи опалення, адіабатна температура, відхідні гази, ККД.*

Summary. *The results of research on the main thermal parameters of a 2 MW hot water boiler using the method of recirculating exhaust gases into the combustion air are presented. The research was carried out under different operating modes of the boiler during the heating season, with a change in its thermal load from 30 to 100%, and with different proportions of recirculated gases (from 10 to 20%) in a mixture with combustion air. It has been shown that the use of exhaust gas recirculation in the considered method leads to a decrease in the boiler efficiency by 1.3-3.1%.*

Key words: *gas-fired boilers, heating system parameters, adiabatic temperature, exhaust gases, efficiency.*

Вступ. Найбільш широко застосовуваним в котельній практиці способів зниження викидів оксидів азоту є рециркуляція в топку котла частини його димових газів в суміші з дуттьовим повітрям [1; 2]. Здебільшого обсяг рециркульованих газів становить 5 – 25 % від витрати відхідних газів, а їхня температура 300 – 400 °С. Така температура, як відомо, відповідає у котлах великої теплопродуктивності температурі продуктів згоряння перед повітрянагрівачем котла. Баластування дуттьового повітря продуктами згоряння зменшує концентрацію кисню в зоні горіння. Цей вплив є найбільш ефективним у разі коефіцієнта надлишку повітря в рециркульованих газах приблизно рівного одиниці. Надходження в топковий простір котла баластованих газів з температурою значно нижчою топкової знижує температурний рівень в зоні горіння. Обидва зазначені фактори сприяють пригнічуванню утворення оксидів азоту і зниженню їх викидів в навколишнє середовище. Однак, слід відмітити, що розглянутий спосіб екологізації котла призводить до зниження його теплової ефективності [1].

Останнім часом спостерігається тенденція до застосування описаного способу зниження обсягів утворення оксидів азоту в котельних установках, які не укомплектовані підігрівачами дуттьового повітря [3–5]. У цьому разі рециркульовані гази після котла підмішуються у холодне дуттьове повітря. Однак, зниження оксидів азоту в такий спосіб і для таких котлів має суттєві недоліки. Зокрема, через низьку температуру підмішуваних відхідних газів (зазвичай 160 – 190 °С) котла більшою мірою зменшується його ККД у порівнянні з ситуацією відбору рециркульованих газів з температурою 300 – 400 °С. Дана робота присвячена дослідженню

показників ефективності котельної установки з рециркуляцією димових газів за різних умов її експлуатації.

Мета роботи полягає у визначенні теплових показників водогрійної котельної установки з рециркуляцією в топку котла частини його відхідних газів в суміші з дуттьовим повітрям при різних параметрах приєднаної системи опалення.

Методика проведення досліджень. Методика досліджень базувалася на використанні відомого нормативного методу теплового розрахунку котельних установок [6].

Використовувався опалювальний котел КСВа – 2,0Г теплопродуктивністю 2 МВт. Розглядалися умови експлуатації котла в різних кліматичних умовах, а саме з розрахунковою температурою навколишнього середовища $t_{\text{нс}}^1 = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $t_{\text{нс}}^2 = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для обох ситуацій використовувалась система опалення з параметрами теплоносія $70 - 95\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Визначалися в різних режимах експлуатації котла протягом опалювального періоду основні його теплові показники в умовах застосування способу рециркуляції димових газів з часткою χ від 10 до 20% у загальному обсязі суміші з дуттьовим повітрям. Показники розраховувались для двох розглянутих ситуацій кліматичних умов використання котельної установки. Тепловий розрахунок котла здійснювався за вищою теплотою згоряння палива та за умови збереження витрати газу на котел у всіх режимах на відповідному рівні до застосування рециркуляції.

Результати досліджень. На рис. 1 наведено результати досліджень щодо зміни адіабатної температури в зоні горіння котла при його експлуатації в різних кліматичних умовах. Результати досліджень свідчать, що додавання газів рециркуляції в топковий простір котла викликає зниження температури $t_{\text{ад}}$ в зоні горіння і тим більше, чим більша частка χ додавання рециркульованих газів у дуттьове повітря. При цьому за умов

експлуатації котла протягом опалювального періоду в зонах з більш холодним кліматом ($t_{\text{nc}}^1 = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$) зниження $t_{\text{ад}}$ відбувається на 150 – 250 $^{\circ}\text{C}$. Більший рівень зниження адиабатної температури відповідає вищій теплопродуктивності котла та більшій частці рециркуляції χ . Для регіонів з вищою розрахунковою температурою навколишнього середовища ($t_{\text{nc}}^2 = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$) спостерігаються ті ж тенденції, але інтервал зниження вказаної температури є дещо іншим і становить 137 – 263 $^{\circ}\text{C}$. Отримані розрахункові дані зумовлюються впливом на $t_{\text{ад}}$ температурних показників рециркульованих газів, які визначаються режимом роботи котла та тепловим графіком розглянутих систем опалення.

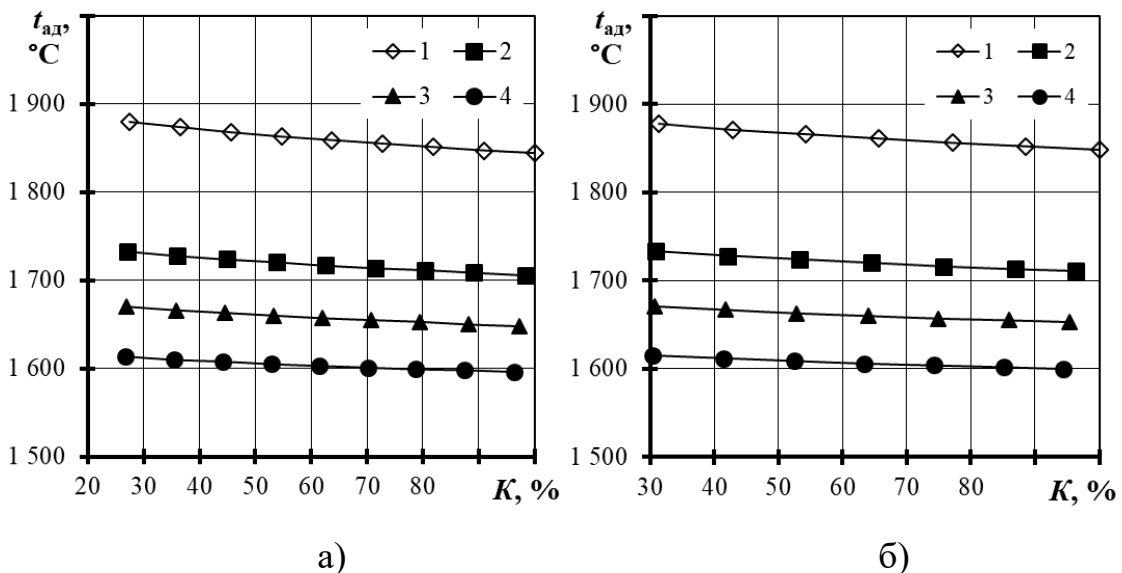


Рис. 1. Залежність адиабатної температури горіння $t_{\text{ад}}$ від відносного теплового навантаження K котла при різних частках χ рециркульованих газів для систем опалення з розрахунковою температурою навколишнього середовища $t_{\text{nc}}^1 = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) та $t_{\text{nc}}^2 = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б): 1 – $\chi = 0\%$; 2 – 10% ; 3 – 15% ; 4 – 20%

Рисунок 2 ілюструє результати досліджень щодо залежності від відносного теплового навантаження K котла температури його відхідних газів $t_{\text{відх}}^r$ при різних обсягах рециркульованих газів та різних значеннях розрахункової температури навколишнього середовища t_{nc} .

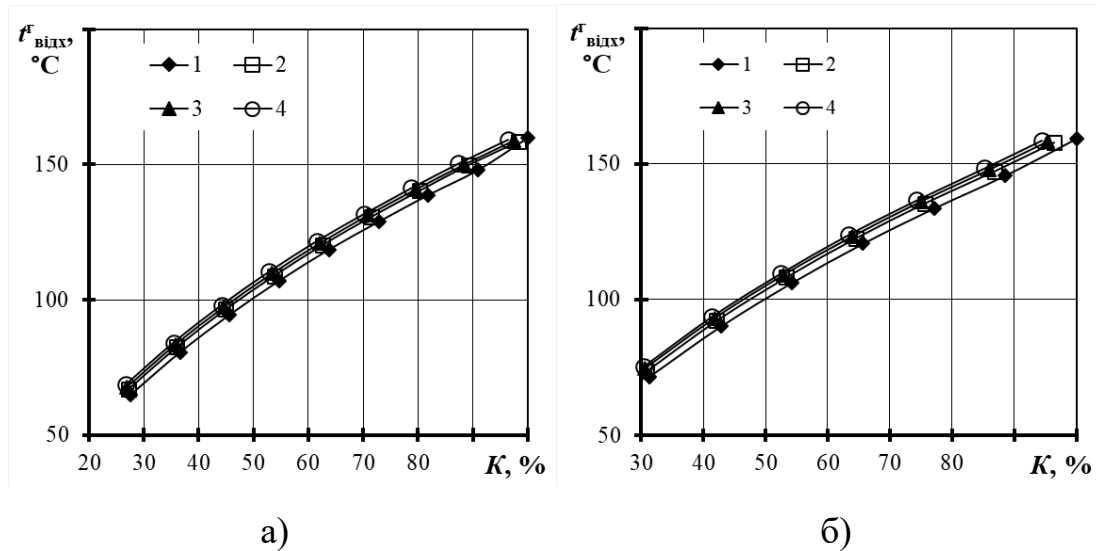


Рис. 2. Залежність від відносного навантаження котла K температури його відхідних газів $t_{\text{вдх}}^{\Gamma}$ при різних частках χ рециркуляції (РЦ) відхідних газів для систем опалення з розрахунковою температурою навколишнього середовища $t_{\text{нс}}^1 = -30\text{ °C}$ (а) та $t_{\text{нс}}^2 = -20\text{ °C}$ (б): 1 – без РЦ; 2 $\chi = 10\%$; 3 – 15% ; 4 – 20%

Отримані результати засвідчили, що для обох розглянутих ситуацій кліматичних показників температура $t_{\text{вдх}}^{\Gamma}$ відхідних газів зменшується зі зменшенням навантаження котла. За даними досліджень у разі використання котла для системи опалення з розрахунковою температурою $t_{\text{нс}}^1 = -30\text{ °C}$ значення $t_{\text{вдх}}^{\Gamma}$ є дещо вищими (на $0,1 - 6,8\text{ °C}$), ніж для $t_{\text{нс}}^1 = -20\text{ °C}$. Більше значення розбіжностей спостерігається за найнижчих відносних навантаженнях котла ($\approx 30\%$). Обсяг рециркульованих газів також викликає деякі зміни в значеннях $t_{\text{вдх}}^{\Gamma}$, які за даними досліджень не перевищують $4,4\text{ °C}$ при розрахунковій температурі навколишнього середовища $t_{\text{нс}}^1 = -30\text{ °C}$ та $3,8\text{ °C}$ при $t_{\text{нс}}^2 = -20\text{ °C}$. Тобто відмінності в $t_{\text{вдх}}^{\Gamma}$ в залежності від $t_{\text{нс}}$ є невеликими.

Виконано також дослідження щодо зміни ККД котла при застосуванні способу рециркуляції димових газів для розглянутих умов. Відповідні дані наведено у табл. 1, 2.

Таблиця 1

ККД котла при різних значеннях його відносного навантаження K та частках χ рециркуляції відхідних газів для систем опалення з розрахунковою температурою навколишнього середовища $t_{\text{нс}}^1 = -30^\circ\text{C}$

Частка рециркуляції χ , %	ККД котла η , % при різних значеннях відносного навантаження K , %								
	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10
0	81,5	82,2	82,8	83,4	84,0	84,7	85,4	86,3	87,3
10	80,0	80,6	81,2	81,8	82,5	83,2	84,0	84,9	86,0
15	79,2	79,8	80,4	81,0	81,7	82,5	83,3	84,2	85,3
20	78,4	79,0	79,6	80,3	81,0	81,7	82,6	83,5	84,6

Таблиця 2

ККД котла при різних значеннях його відносного навантаження K та частках χ рециркуляції відхідних газів для систем опалення з розрахунковою температурою навколишнього середовища $t_{\text{нс}}^1 = -20^\circ\text{C}$

Частка рециркуляції χ , %	ККД котла η , % при різних значеннях відносного навантаження K , %						
	-20	-15	-10	-5	0	5	10
0	81,9	82,7	83,4	84,1	85,0	85,9	87,0
10	80,4	81,1	81,8	82,6	83,5	84,5	85,7
15	79,6	80,3	81,0	81,9	82,8	83,8	85,0
20	78,8	79,5	80,3	81,1	82,1	83,1	84,3

Отримані дані свідчать, що ККД котла зменшується зі збільшенням його відносного теплового навантаження та частки рециркульованих газів χ . Зменшення ККД зумовлено втратами теплоти на нагрівання введених баластованих газів. Рівні ККД для системи опалення з розрахунковою температурою $t_{\text{нс}}^1 = -30^\circ\text{C}$ є дещо нижчими (на 0,3 – 0,4 %), ніж для $t_{\text{нс}}^1 = -20^\circ\text{C}$. Однак, як видно з наведених таблиць, рівні зменшення ККД залежно від обсягів рециркулювання димових газів є приблизно однаковими для

розглянутих кліматичних умов. Так при $\chi = 10\%$ ККД котла зменшується на 1,3 – 1,5 %, при $\chi = 15\%$ – це зменшення відповідає величині 2,0 – 2,3 %, а за умов зростання частки χ до 20%, зниження ККД $\Delta\eta$ має найбільше значення 2,7 – 3,2 %. При цьому більше значення зменшення ККД відповідає номінальному навантаженню котла, а менше – мінімальному.

Отримані результати свідчать, що рециркуляція димових газів призводить до зниження теплової ефективності котла на 1,3 – 3,2 %. Для підвищення ефективності використання палива в опалювальних котлах з рециркуляцією димових газів необхідно застосовувати новітні комбіновані теплоутилізаційні системи з комбінованим використанням утилізованої теплоти для нагрівання різних теплоносіїв [7].

Висновки

1. Застосування рециркуляції відхідних газів за розглянутих умов викликає зниження: адіабатної температури на 137 – 263 °С та ККД котла на 1,3 – 3,2 % в залежності від навантаження котла та частки рециркулювання димових газів від 10% до 20%.

2. Для компенсації втрат теплоти в котлах з рециркуляцією димових газів необхідним є комплектування котельних установок ефективними теплоутилізаційними системами з високим рівнем приросту ККД завдяки комбінованому використанню утилізованої теплоти для нагрівання зворотної тепломережної води та дуттьового повітря.

Література

1. Михайленко В.С., Щербінін В.А., Лещенко В.В., Харченко Р.Ю., Ложечнікова Н.В. Моделювання процесу утворення шкідливих викидів у вихідних газах судових парових котлів. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2020. Т.10, №3–4. С. 154–166. Doi: 10.15276/imms.v10.no 3-4.154

2. Сигал И.Я., Дубоший А.Н., Сигал А.И., Смихула А.В. Повышение эффективности влияния рециркуляции на снижение выбросов оксидов азота котлами электростанций. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2010. №1. С. 48–52.
3. Горбань К. С., Сірій О. А., Абдулін М. З. Можливості впливу струменево-нішової технології на екологічні та експлуатаційні параметри вогнетехнічного об'єкта. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2021. № 2(6). С. 10–14. doi: 10.20998/2078-774X.2021.02.02
4. Tanasić N., Stamenić M., Tanasić V. Effects of Flue Gas Recirculation on NO_x Emissions from Gas-Fired Utility Boilers. In *Current Problems in Experimental and Computational Engineering: Proceedings of the International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies, CNNTech 2021*. 2022. P. 319-337. Springer International Publishing. doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-86009-7_17
5. Кислиця А.О. Екологічне обґрунтування технологічних рішень модернізації обладнання котельної: дипломна робота магістра / Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». Харків, 2020. 84 с.
6. Комбіновані теплоутилізаційні системи для газоспоживальних котлів комунальної теплоенергетики: монографія / Н.М. Фіалко та ін.: Київ: «Про формат». 2019. 192 с.