

ТЕПЛОВІ АСПЕКТИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОПАЛЮВАЛЬНИХ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК З ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЄЮ ТА РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ ДИМОВИХ ГАЗІВ

Н. М. Фіалко, доктор технічних наук, професор, член-кореспондент

НАН України

Р. О. Навродська, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

С. І. Шевчук, кандидат технічних наук

А. І. Степанова, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Р. В. Сергієнко, кандидат технічних наук

Інститут технічної теплофізики НАН України

E-mail: navrodska-ittf@ukr.net

***Анотація.** Наведено аналіз особливостей застосування для опалювальних котельних установок відносно невеликої теплопродуктивності, які не оснащені повітронагрівачами, способу зниження емісії оксидів азоту завдяки зменшенню температури в топці котла шляхом рециркуляції димових газів у дуттьове повітря. Розглядаються газоспоживальні котельні установки з традиційними системами теплоутилізації відхідних газів та реалізацією вказаного способу з відбором рециркульованих газів після котла та після теплоутилізатора. Наводяться результати досліджень для водогрійного котла теплопродуктивністю 2 МВт закономірностей зміни температури горіння в топці котла, температури його відхідних газів та нагріваної в котлі води, а також ККД котла в залежності від його відносного теплового навантаження (в межах від 30 до 100 %) та за різних часток рециркульованих газів (від 10 до 20 %) у суміші з дуттьовим повітрям. Дослідження виконувались за наявності рециркуляції і теплоутилізації димових газів та без них. За результатами досліджень показано, що застосування рециркуляції відхідних газів викликає відчутне зниження (на 150 – 250 °С) адіабатної температури горіння та незначне (на 0,5 ÷ 4,7 °С) зменшення температури відхідних газів котла. Рециркуляція також призводить до зменшення ККД котла на 1,3 – 3,1 % протягом опалювального періоду, а використання розглянутої системи теплоутилізації відхідних газів котла з нагріванням шляхом їхнього охолодження зворотної тепломережної води забезпечує приріст ККД котла на 2,5 – 8,1 %. Результуючий приріст ККД котла з системою теплоутилізації та рециркуляції становить 0,1 – 4,8 %.*

***Ключові слова:** газоспоживальні котли, екологічна та теплова ефективність, підігрівання дуттьового повітря*

Перелік позначень: G – витрата газу на котел, $\text{м}^3/\text{год}$; K – відносне навантаження котла, %; T, t – температура, $^{\circ}\text{C}$; X – вологовміст газів, $\text{кг}/\text{кг}$ с.г.; Δt – перепад температур, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta\eta$ – приріст (зниження) ККД, %; η – ККД котла, %; σ – частка рециркуляції, %. **Індекси:** ад – адіабатна; в – вода; від – відхідний; г – гази; нс – навколишнє середовище; о – опалення; п – паливо; пр – пряма; р – роса; рез – результуючий.

Актуальність. Проблеми енергозбереження та покращення умов довкілля стали пріоритетними в світовій енергетичній практиці. Основними напрямками вирішення цих нагальних проблем у комунальній теплоенергетиці є покращення екологічності котельних установок та підвищення ефективності використання в них палива. Актуальність наукових завдань за вказаними напрямками зростає у зв'язку з неуклінним здорожчанням палива та посиленням вимог щодо зменшення забруднення навколишнього середовища.

Один із шляхів покращення екологічних показників котельних установок полягає в зниженні викидів оксидів азоту в навколишнє середовище завдяки пригнічуванню їх утворення в топковому просторі котла при зниженні температури горіння. Зниження вказаної температури може досягатись різними способами, одним із яких є рециркуляція димових газів у топковий простір котла [1-4]. При цьому достатньо апробованим цей спосіб є для котлів високої теплопродуктивності, в яких реалізується введення в топку димових газів, відібраних перед повітрянагрівачем котла. Застосування способу рециркуляції димових газів у дуттьове повітря для опалювальних котлів невеликої теплопродуктивності, які не оснащені повітрянагрівачами, пов'язане з певними труднощами щодо забезпечення дієвості цього способу в усіх режимах експлуатації котла [5]. До того ж, рециркуляція димових газів призводить до перевитрат палива в котлі, а відтак і до зниження його ККД через необхідність нагрівання введених газів. Тому застосування рециркуляції димових газів у такий спосіб для вказаних котлів є дуже обмеженим.

Однак, значне зростання вартості палива та підвищення вимог щодо покращення умов довкілля спонукає до пошуку нових ефективних рішень екологоенергоощадних технологій і для опалювальних котельних установок

відносно невеликої теплопродуктивності, які не оснащені повітронагрівачами. Одним із факторів, що стримують застосування таких технологій, є обмеженість обґрунтованих даних щодо їхньої ефективності.

Актуальність даної роботи полягає у вивченні та аналізі теплових аспектів експлуатації опалювальних котельних установок з системами теплоутилізації та без них при застосуванні способу рециркуляції відхідних димових газів у дуттьове повітря.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Технологія рециркуляції димових газів для зниження обсягів утворення оксидів азоту набула поширення наприкінці 70-х років ХХ ст. та дотепер широко застосовується в котельній практиці. Зниження обсягів утворення «термічних» NO_x можна досягти шляхом впливу на максимальну температуру горіння, що забезпечується введенням газів рециркуляції, води і пари в зону горіння або в дуттьове повітря, а також дво- та триступінчатим спалюванням палива, яке знижує максимальну температуру та вміст кисню в зоні максимальних температур.

Результатам досліджень щодо застосування технології рециркуляції димових газів у котлах присвячено багато робіт, для прикладу [1-4], які свідчать про ефективність цієї технології. Зазвичай димові гази з температурою 300 – 400 °С відбираються перед повітронагрівачем котла та спеціальним рециркуляційним димососом подаються в топкову камеру. У результаті максимальна температура в топці знижується на 120 – 130 °С та, крім того, падає концентрація кисню в зоні горіння, що також зменшує утворення паливних NO_x . При цьому ККД котла знижується порівняно мало (0,01 – 0,03 % на 1 % рециркуляційних газів) [1]. Однак, в літературних джерелах не виявлено даних щодо ефективності цієї технології для котлів малої та середньої потужності при додаванні відхідних газів котла безпосередньо в холодне дуттьове повітря. Тому дослідження щодо можливості та ефективності застосування способу рециркуляції димових газів в дуттьове повітря для котлів, не укомплектованих повітропідігрівачами, є основним завданням даної роботи.

Мета дослідження – дослідження основних теплових показників опалювальних котельних установок з системами теплоутилізації та без них при застосуванні способу рециркуляції відхідних димових газів у дуттьове повітря.

Для досягнення мети вирішувались **основні завдання дослідження**, що полягали у визначенні для різних режимів роботи опалювального котла з системою теплоутилізації та без неї таких параметрів, як адіабатна температура горіння, температура відхідних газів та ККД котла при рециркуляції його відхідних димових газів з різними їх частками в суміші з дуттьовим повітрям.

Матеріали та методи дослідження. Для визначення основних характеристик теплоутилізаційних систем використовувалися відомі методи теплового розрахунку котельних установок та експериментальних досліджень, отриманих авторами [6, 7].

Розрахункові дослідження здійснювались з використанням у системах теплоутилізації газоспоживального опалювального котла номінальною теплопродуктивністю 2 МВт. Відносна тепла продуктивність котла K змінювалась від 100 до 30 % протягом опалювального періоду відповідно до зміни температури атмосферного повітря від -30 до $+10$ °С. Теплові розрахунки виконувались за умови підключення котла до системи опалення з розрахунковою температурою навколишнього середовища -30 °С та температурним перепадом теплоносія $\Delta t_0 = 25$ °С. Коефіцієнт надлишку повітря становив 1,1. ККД котла, розрахований за вищою температурою згоряння палива, становив 86,2 % в номінальному режимі без застосування системи теплоутилізації та рециркуляції, а температура відхідних газів – 157 °С. При рециркуляції димових газів у дуттьове повітря їхні частки φ становили $\varphi = 10, 15$ і 20 % у повітрогазовій суміші.

Розглядалися дві ситуації при застосуванні рециркуляції димових газів: за умови збереження витрати газу на котел на рівні, відповідному в заданому режимі без застосування рециркуляції ($G_T = \text{const}$), або при дотриманні теплового графіка котельні щодо необхідних значень температур прямої води котла ($T_B^{\text{пр}} = \text{const}$).

При застосуванні систем теплоутилізації використовувалися традиційні теплоутилізаційні системи з одиночними теплоутилізаторами, призначеними для нагрівання зворотної тепломережної води згідно з температурним графіком та

параметрами застосованої системи опалення. При цьому розглядалися два варіанти реалізації способу рециркуляції газів у дуттьове повітря (рис.1).

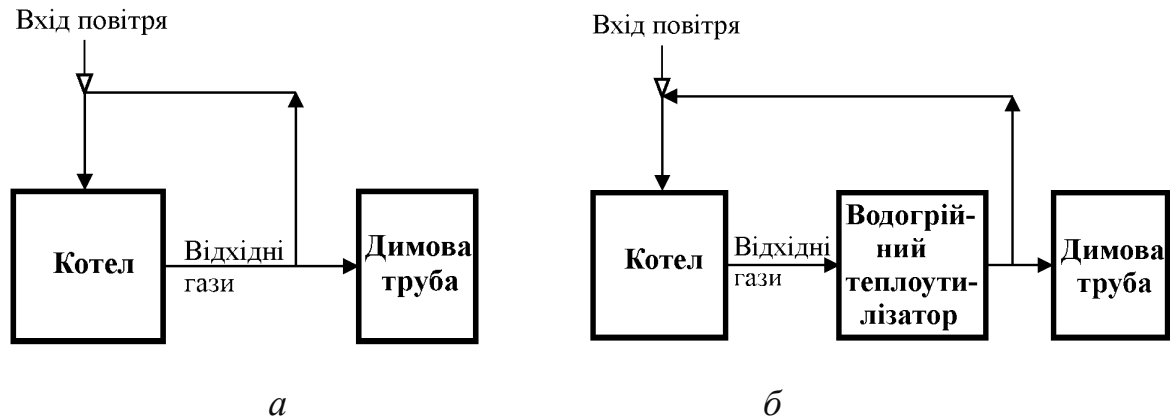


Рис. 1. Варіанти реалізації способу рециркуляції димових газів для котельних установок з відбором газів рециркуляції після котла (а) та після теплоутилізатора (б)

Результати досліджень та їх обговорення.

Встановлення закономірностей зміни теплових характеристик котла в умовах рециркуляції його відхідних газів

Застосування технологій рециркуляції димових газів для покращення екологічних показників котла, як відомо, характеризується зменшенням температури горіння в топці котла та зменшенням його теплової ефективності через нагрівання введеного баласту. Результати розрахунку адіабатної температури горіння в топці котла показали, що за умов рециркуляції відхідних газів з часткою β від 10 до 20 % після котла (рис.1, а) відбувається зниження цієї температури на 150 – 250 °С. І чим більша частка рециркуляції β , тим нижчий рівень зазначеної температури.

Рециркуляція димових газів за розглянутих умов зумовлює також невеликі зміни в температурі відхідних газів котла $t_{\text{від}}^{\Gamma}$. За результатами досліджень за умов збереження витрати газу в котлі $G_{\Gamma} = \text{const}$ температура $t_{\text{від}}^{\Gamma}$ відхідних газів котла дещо знижується (на 0,5 °С) у номінальному режимі (при температурі навколишнього середовища $t_{\text{нс}} = -30$ °С) та підвищується (до 4,0 °С) при мінімальному навантаженні котла на 30 % і $t_{\text{нс}} = +10$ °С. Виконані теплові розрахунки засвідчили

також, що за умови $G_r = \text{const}$ знижується температура $T_b^{\text{пр}}$ нагрітої в котлі прямої води порівняно з необхідною за тепловим графіком системи. Проведено відповідні теплові розрахунки котла при дотриманні рівня нагрітої $T_b^{\text{пр}} = \text{const}$ згідно з тепловим графіком. За цих умов збільшується витрата газу на котел G_r . Результати свідчать, що при $T_b^{\text{пр}} = \text{const}$ температура відхідних газів за котлом підвищується на $1,4 \div 4,7 \text{ } ^\circ\text{C}$ через необхідність збільшення G_r . Відносно невелика зміна температури відхідних газів котла, незважаючи на суттєве зменшення температури горіння порівняно з ситуацією без застосування рециркуляції, пояснюється більш ефективним теплообміном в топці та конвективній частині котла завдяки збільшенню обсягів димових газів при рециркуляції.

Виконано також розрахункові дослідження закономірностей зміни ККД η котла за умов застосування систем рециркуляції його відхідних газів (рис.1а) в холодне дуттьове повітря для двох розглянутих ситуацій ($G_r = \text{const}$ та $T_b^{\text{пр}} = \text{const}$). Відповідні дані щодо зміни ККД котла наведено на рис. 2.

Результати досліджень свідчать, що для обох розглянутих варіантів величина ККД котла зменшується зі збільшенням відносного навантаження котла K та частки $\div$ рециркулювання димових газів. При чому, при $G_r = \text{const}$ зменшення ККД дещо менше, ніж при $T_b^{\text{пр}} = \text{const}$. Зниження ККД котла зумовлено зменшенням його теплопродуктивності через зниження теплового напору в топці котла в результаті зниження адіабатної температури горіння.

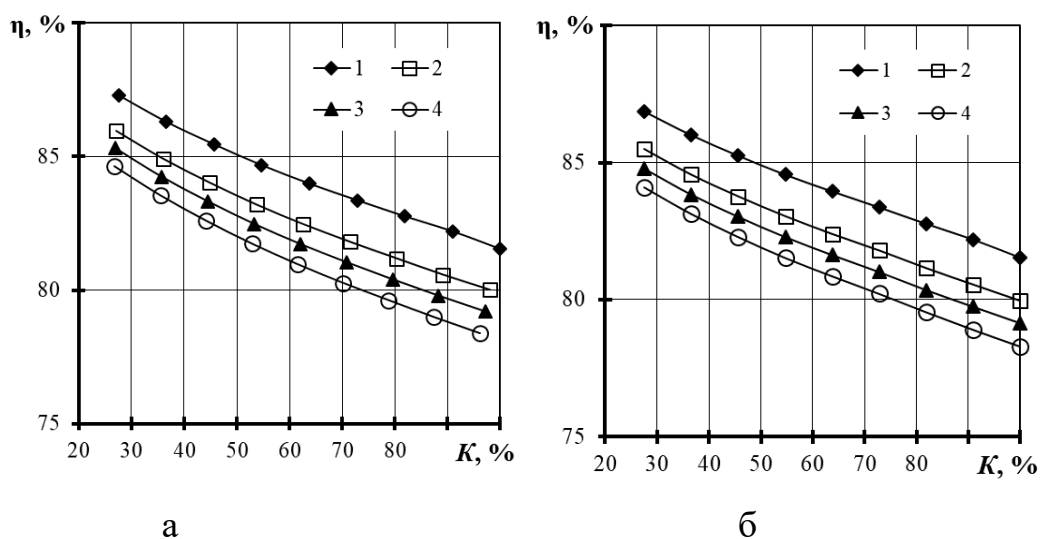


Рис. 2. Залежність ККД котла η від його відносного теплового навантаження K при різних частках σ рециркульованих відхідних газів котла при $G_r = \text{const}$ (а) та при $T_b^{\text{np}} = \text{const}$ (б):
 1 – $\sigma = 0 \%$; 2 – 10% ; 3 – 15% ; 4 – 20%

Е таблиці 1 наведено дані щодо температур нагрітої (прямої) води котла, а на рис. 3, а – показники витрати газу на котел в різних режимах його експлуатації при $G_r = \text{const}$. Як видно з наведеної таблиці, температура води зменшується зі збільшенням частки рециркуляції σ . За цих умов дотримання теплового графіка котельні порушується.

1. Температура нагрітої прямої води T_b^{np} котла при різних температурах навколишнього середовища та частках σ рециркульованих газів при $G_r = \text{const}$

Частка рециркуляції σ , %	Температура прямої води T_b^{np} , °C при різних значеннях температури навколишнього середовища t_{nc} , °C								
	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10
0	95,0	88,8	82,6	76,1	69,5	62,6	55,3	47,7	39,3
10	94,5	88,4	82,2	75,8	69,2	62,3	55,1	47,5	39,2
15	94,3	88,2	82,0	75,6	69,0	62,2	55,0	47,4	39,2
20	94,0	87,9	81,8	75,4	68,9	62,1	55,0	47,4	39,1

Виконано також дослідження теплових показників котельної установки за умови дотримання теплового графіка котельні, тобто при значеннях температур нагрітої води, які вказані в табл. 1 при $\sigma = 0 \%$. У цій ситуації дотримується тепловий графік при усіх значеннях σ , але дещо збільшується витрата палива G_r на котел (рис. 3, б).

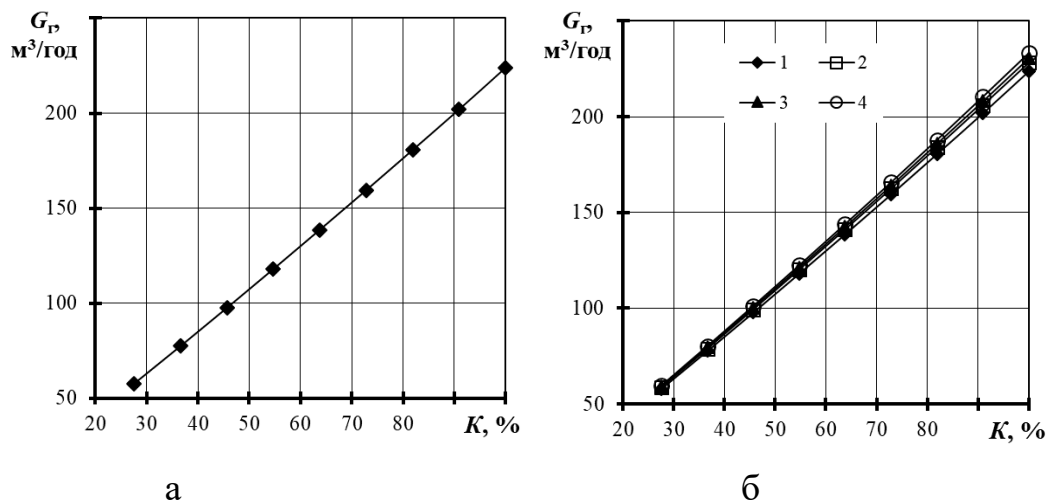


Рис. 3. Залежність витрати палива котла $G_{\text{гр}}$ від його відносного теплового навантаження K за різних часток σ рециркульованих газів при $G_{\text{г}} = \text{const}$ (а) та при $T_{\text{в}}^{\text{пр}} = \text{const}$ (б):
 1 – $\sigma = 0 \%$; 2 – 10% ; 3 – 15% ; 4 – 20%

Результати досліджень засвідчили також, що для обох розглянутих ситуацій (за умов рівності витрати палива або при дотриманні необхідної температури прямої води) величини зміни ККД дуже близькі. На рис. 4 до прикладу наведено рівні зменшення ККД котла $\Delta\eta$ в залежності від частки рециркуляції σ при $G_{\text{г}} = \text{const}$.

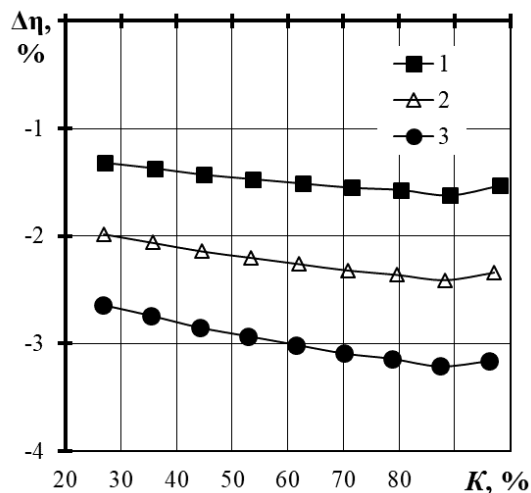


Рис. 4 Залежність зменшення ККД котла $\Delta\eta$ від його відносного теплового навантаження K при різних частках σ рециркульованих газів при $G_{\text{г}} = \text{const}$:
 1 – $\sigma = 10 \%$; 2 – 15% ; 3 – 20%

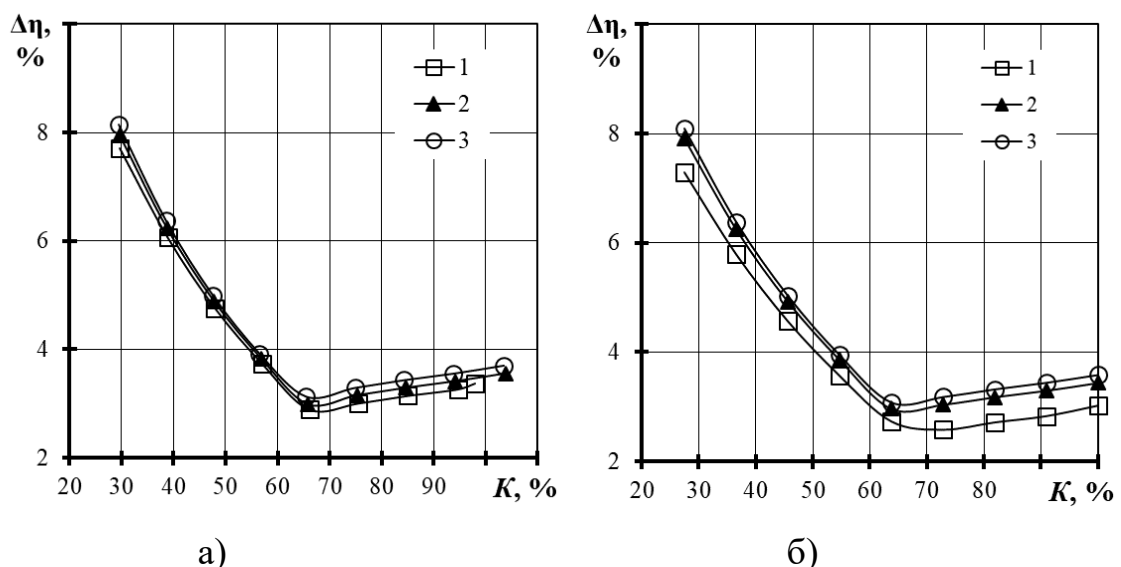
Як видно з наведених результатів, при $\sigma = 10 \%$ ККД котла зменшується на 1,3 – 1,6 %, при $\sigma = 10 \%$ σ це зменшення відповідає величині 2,0 – 2,4 %, а за умов зростання частки σ до 20 %, зниження ККД має найбільше значення 2,8 – 3,1%. За літературними даними [1] ККД котла знижується на 0,01–0,03 % на 1 % рециркульованих газів за умов їхньої температури 300 – 400 °С. Отримані значення щодо рівнів зменшення ККД η котла більші, що пояснюється нижчою температурою рециркульованих відхідних газів котла порівняно з відбором цих газів перед повітропідігрівачем котла.

Аналіз теплової ефективності котла при застосуванні систем теплоутилізації димових газів

Зниження ККД котла за умов рециркуляції димових газів може бути компенсовано частково або повністю шляхом застосування сучасних

теплоутилізаційних технологій, і, зокрема, з використанням водогрійного теплоутилізаційного устаткування (див. рис 1, б) з глибоким охолодженням димових газів у деяких режимах експлуатації котла. В даному устаткуванні нагрівається зворотна тепломережна вода перед надходженням її до котла. В роботі визначено рівні підвищення ефективності котельної установки завдяки застосуванню цього устаткування. На рис. 5 наведено відповідні результати для двох розглянутих в роботі ситуацій (при $G_r = \text{const}$ та при $T_b^{\text{np}} = \text{const}$).

Як видно з рис. 5, рівні приросту ККД котла $\Delta\eta$ в залежності від його відносного теплового навантаження K змінюються в діапазоні 2,8 – 8,1 % при $G_r = \text{const}$ та 2,5 – 8,0 % при $T_b^{\text{np}} = \text{const}$. Більше значення $\Delta\eta$ відповідає теплому періоду сезону опалення при невеликих теплових навантаженнях котла, які реалізуються за низьких температур зворотної тепломережної води, що надходить у теплоутилізатор для нагрівання. За результатами досліджень розшарування значень приросту ККД котла $\Delta\eta$ в залежності від частки σ рециркульованих газів спостерігається більшим за великих відносних навантажень котла ($K \geq 60$ %). За цих навантажень реалізується конденсаційний режим експлуатації теплоутилізатора, який суттєво впливає на приріст ККД, і вплив частки σ виявляється суттєвішим.



**Рис. 5. Залежність приросту ККД котла $\Delta\eta$ від його відносного теплового навантаження K при різних частках σ рециркульованих газів при $G_r = \text{const}$ (а) та при $T_b^{\text{np}} = \text{const}$ (б):
1 – $\sigma = 10$ %; 2 – 15 %; 3 – 20 %**

Отримані результати досліджень показують, що значення приросту ККД котла завдяки застосуванню теплоутилізації цілком компенсують його зменшення в результаті використання технології рециркуляції димових газів. Результати досліджень також засвідчили про збільшення рівня нагрівання води в теплоутилізаторі та котлі при дотриманні витрати газу на котел ($G_r = \text{const}$) у порівнянні з ситуацією дотримання теплового графіка котельні ($T_b^{\text{пр}} = \text{const}$). Так за умови $G_r = \text{const}$ і надходженні до котла вже підігрітої в теплоутилізаторі на величину $\Delta t_{\text{зв}}$ зворотної води рівень її нагрівання в котлі є вищим. При забезпеченні умови $T_b^{\text{пр}} = \text{const}$, оскільки на вхід котла надходить уже підігріта вода, на догрівання її до температури згідно з тепловим графіком необхідно витратити менше палива. Ця ситуація є протилежною порівняно з використанням котельних установок з рециркуляцією димових газів без систем теплоутилізації, коли навпаки: за умов дотримання витрати газу на котел ($G_r = \text{const}$) температура нагрітої води в котлі зменшується, а при $T_b^{\text{пр}} = \text{const}$ витрата палива на котел збільшується.

За результатами виконаних досліджень встановлено, що результуючі значення приросту ККД котла котельної установки з рециркуляцією та теплоутилізацією димових газів для обох розглянутих ситуацій є дуже близькими. Рис. 6 ілюструє дані щодо зіставлення значень зміни ККД котла при застосуванні розглянутої технології рециркуляції димових газів в досліджуваних варіантах для найвищої частки ($\sigma = 20\%$) рециркулювання димових газів, за якої мають місце найбільші рівні зменшення ККД котла.

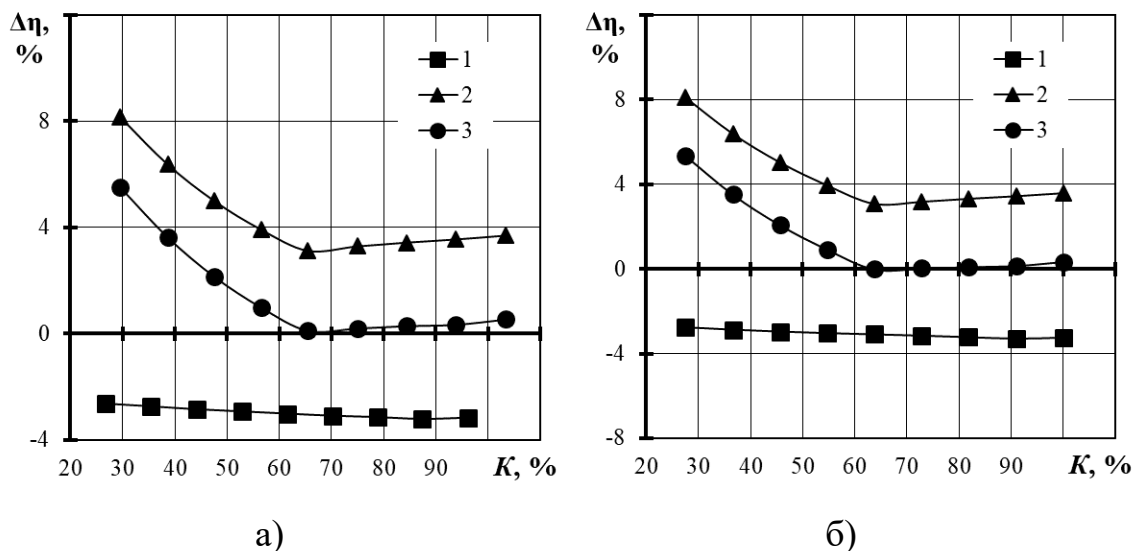


Рис. 6. Залежність від відносного теплового навантаження K котла зміни ККД $\Delta\eta$ в котлі (1), в теплоутилізаторі (2) та загального для котельної установки (3) при частці рециркульованих газів $\sigma = 20 \%$ за умови $G_r = \text{const}$ (а) та $T_b^{\text{np}} = \text{const}$ (б)

Результати свідчать, що застосування для котла з рециркуляцією димових газів розглянутої традиційної системи теплоутилізації забезпечує результуючий приріст ККД $\Delta\eta_{\text{рез}}$ котла до 4,8 %. Причому в ситуації дотримання витрати газу на котел ($G_r = \text{const}$) на рівні його значень без застосування рециркуляції приріст $\Delta\eta_{\text{рез}}$ дещо вищий, ніж при дотриманні теплового графіка котельні ($T_b^{\text{np}} = \text{const}$). Однак, використання розглянутої системи теплоутилізації не дозволяє вирішити проблему, пов'язану з конденсацією та обмерзанням поверхонь підвідних повітропроводів котла [5]. Застосування комбінованих теплоутилізаційних систем з використанням утилізованої теплоти окрім нагрівання зворотної води ще і для нагрівання повітря дозволить підвищити ефективність та надійність опалювальних котельних установок малої та середньої потужності з рециркуляцією димових газів.

Висновки і перспективи. Виконано розрахункові дослідження та визначено основні показники теплової ефективності котельних установок з системами рециркуляції димових газів у дуттьове повітря за умов застосування розглянутих теплоутилізаційних технологій та без них. При цьому показано, що:

1. Застосування рециркуляції відхідних газів викликає відчутне зниження (на 150–250 °С) адіабатної температури горіння та незначне (на 0,5 ÷ 4,7 °С) зменшення температури відхідних газів котла та призводить до зменшення ККД котла на 1,3 – 3,1 % в залежності від навантаження котла та частки рециркулювання димових газів від 10 % до 20 %.

2. Використання теплоутилізації відхідних газів котла і нагріванням шляхом їхнього охолодження зворотної тепломережної води забезпечує приріст ККД котла на 2,5 – 8,1 %. Результуючий приріст ККД котла з системою теплоутилізації та рециркуляції становить 0,1 – 4,8 %.

За результатами виконаних досліджень запропоновано напрям підвищення ефективності теплоутилізаційних систем, які забезпечуватимуть високу теплову та

екологічну ефективність котельних установок із запобіганням конденсації утворенню в повітропідвідних трактах [8]. Цей напрям пов'язаний з розробленням нових ефективних систем теплоутилізації з використанням повітрогріючого устаткування.

Список використаних джерел

1. Михайленко В.С., Щербінін В.А., Лещенко В.В., Харченко Р.Ю., Ложечнікова Н.В. Моделювання процесу утворення шкідливих викидів у вихідних газах суднових 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. Мельник О.В., Сорока В.В., Гаталяк М.Я. Методи зниження вмісту токсичних компонентів відпрацьованих газів суднових дизелів. Водний транспорт. 2021. № 1(32). С. 64–74. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.1.32.08
3. 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.
4. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Степанова А. І., Гнедаш Г. О. Підвищення надійності котельних установок з рециркуляцією та теплоутилізацією димових газів. Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". 2022. №14. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-14-8419>
5. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / под ред. Н.В. Кузнецова. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 296 с.
6. Навродская Р.А., Степанова А.И., Шевчук С.И., Гнедаш Г.А., Пресич Г.А. Экспериментальное исследование теплообмена при глубоком охлаждении продуктов сгорания газопотребляющих котлов. Науковий вісник НЛТУ України. 2018. Т.28, №6. С. 103–108. <https://doi.org/10.15421/40280620>
7. Fialko N.M., Navrodska R.O., Gnedash G.O., Presich G.O., Shevchuk S.I. Study of Heat Recovery Systems for Heating and Moisturing Combustion Air of Boiler Units. Nauka innov. 2020. V. 16, no. 2. P. 47–53. <https://doi.org/10.15407/scin16.03.047>
8. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Шевчук С.І., Степанова А.І. Покращення екологічної обстановки шляхом застосування технологій рекуперації тепла котелень. Національний Гірничий Університет. Науковий вісник. 2021. №6. С. 148–152. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-6/148>

References

1. Mikhailenko, V.S., Shcherbinin, V.A., Leshchenko, V.V., Kharchenk, R.Yu., Lozhechnikova N.V. (2020). Modeling the process of hazardous emissions formation in the exhaust gases of ship's steam boilers. Informatics and Mathematical Methods in Simulation, 154. DOI 10.15276/imms.v10.no 3-4.154
2. Melnyk, A.V., Soroka, V.V., Gatalyak, M. Y. (2021). Methods for redusing the content of toxic components in waste gases marine diesel. Water transport, 64-74. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.1.32.08
3. Sigal, I.Ya., Duboshiy, A.N., Sigal, O.I., Smikhula A.V. (2010). Increase of Smoked Gases Recirculation Influence on Nitrogen Oxides Emission from Power Plant Boilers Reduction. Energy Technologies & Resource Saving.

4. Fialko, N. M., Navrodska, R. O., Shevchuk, S. I., Stepanova, A. I., Gnedash, G. O. (2022). Improving the reliability of boiler plants with recirculation and heat recovery of exhaust gases. International Scientific Journal "Internauka". (14). <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-14-8419>
5. Teplovoy raschet kotelnykh agregatov [Thermal calculation of boiler units]. Normative method / ed. N.V. Kuznetsova M.: ECOLIT, 2011. 296 p.
6. Navrodska, R. A., Stepanova, A. I., Shevchuk, S. I., Gnedash, G. A., Presich, G. A. (2018). Experimental investigation of heat-transfer at deep cooling of combustion materials of gas-fired boilers. Scientific Bulletin of UNFU, 28(6), 103-108. <https://doi.org/10.15421/40280620>
7. Fialko, N. M., Navrodska, R. O., Gnedash, G. O., Presich, G. O., Shevchuk, S. I. (2020). Study of Heat Recovery Systems for Heating and Moisturing Combustion Air of Boiler Units. Science and Innovation, 16(3), 43-49. <https://doi.org/10.15407/scin16.03.047>
8. Fialko, N. M., Navrodska, R. O., Shevchuk, S. I., Stepanova, A. I. (2021). Improvement of environmental conditions by applying heat recovery technologies of boiler plants. Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk, (6), 148-152. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-6/148>

Thermal aspects of heating boiler plants operation with heat-recovery and exhaust gas recirculation

N. Fialko, R. Navrodska, S. Shevchuk, A. Stepanova, R. Serhiienko

Abstract. *The feature analysis of application for heating boiler plants of relatively small heating capacity, which are not equipped with air heaters, of the method of reducing the emission of nitrogen oxides due to decrease the temperature in the boiler furnace by recirculating exhaust gases into the blown air are presented. At the same time, heating gas-consuming boiler plants with traditional heat recovery systems of exhaust gases and implementation of this method with the selection of recycled gases after the boiler and heat-recovery exchanger are considered. The study results for a water-heating boiler with a heating capacity of 2 MW of the change regularities of the combustion temperature in the boiler furnace, the its exhaust gases temperature and water heated in the boiler as well as the boiler efficiency, depending on its relative heat load changed (from 30 to 100%) and with different parts of recirculated gases (from 10 to 20%) in the mixture with the blown air are presented. The studies were performed with and without them recirculation and heat recovery of flue gases. The research results show that the use of waste gas recirculation causes a noticeable decrease (by 150 – 250°C) in the combustion adiabatic temperature and a slight (by 0.5 – 4.7°C) decrease in the boiler waste gases temperature. Recirculation also leads to a decrease in boiler efficiency by 1.3 – 3.1% during the heating period, and the use of the considered heat recovery system of boiler waste gases with heating of return heat-network water by cooling them provides an increase in boiler efficiency by 2.5 – 8.1%. The resulting increase in boiler efficiency with a heat recovery and recirculation system is 0.1–4.8%.*

Key words: *gas-consuming boilers, environmental and thermal efficiency, heating of blown air*