

УДК 662.99:621.184.5

ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕКОЛОГОЕФЕКТИВНИХ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК КОМУНАЛЬНОЇ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ

Фіалко Н.М.¹, Навродська Р.О.², Шевчук С.І.³, Абдулін М. З.⁴

¹член-кореспондент НАН України, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, зав. відділу, професор, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net

²канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, пров. наук. співр., старший науковий співробітник, orcid.org/0000-0001-7476-2962, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

³канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, ст. наук. співр., orcid.org/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com

⁴докт. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, ст. наук співр.; докт. техн. наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, професор, orcid.org/0000-0001-9900-7314, e-mail: mzabdulin@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.6>

Наведено результати теплових розрахунків опалювального котла з системою рециркуляції в його топковий простір відхідних газів в суміші з дуттьовим повітрям. Встановлено закономірності зміни адіабатної температури горіння і тепловолісних характеристик суміші в залежності від часток рециркуляції та теплового навантаження котла.

The thermal calculation results of a heating boiler with a recirculation system into its furnace space of exhaust gases mixed with blown air are presented. The change regularities of the combustion adiabatic temperature and mixture heat and humidity characteristics depending parts of the recirculation and the heat load boiler are established.

Бібл. 7, табл. 4, рис. 3.

Ключові слова: газоспоживальні котельні установки, димові гази, рециркуляція, конденсатоутворення в повітроводах.

B – витрата газу, кг/с;

K – відносне навантаження котла, %;

T, t – температура, °С;

X – вологовміст газів, кг/кг с.г.;

Δt – перепад температур, °С;

σ – частка рециркуляції, %;

Індекси:

ад – адіабатна;

в – вода;

від – відхідний;

г – гази;

нс – навколишнє середовище;

о – опалення;

п – паливо;

пр – пряма;

р – роса;

с – суміш.

Вступ

Сучасний розвиток енергетики характеризується значним збільшенням вартості енергоносіїв та всіх видів природних ресурсів, а також зростаючими вимогами щодо охорони навколишнього середовища від впливу паливоспоживальних енергетичних об'єктів комунальних та промислових підприємств. З огляду на це, всіляке удосконалення енерготехнологій в таких пріоритетних напрямках, як заощадження палива та підвищення екологічності є дуже важливим для розвитку енергетичного господарства України.

На сьогодні проблема енергозбереження в комунальній теплоенергетиці певною мірою вирі-

шується шляхом утилізації теплоти продуктів згорання палива в котельних установках. Перспективним напрямом щодо покращення екологічних показників цих установок є напрям зниження емісії оксидів азоту методом рециркуляції димових газів в топковий простір котла. Зниження емісії досягається шляхом впливу на максимальну температуру горіння, що забезпечується введенням газів рециркуляції. Згідно з дослідженнями [1–6], рециркуляція забезпечує для газоспоживальних котлів зниження до 70% викидів оксидів азоту з їхніми відхідними газами.

Особливістю впровадження методу рециркуляції димових газів є той факт, що він не потребує модернізації

основного устаткування, додаткової площі, зміни технологічного процесу тощо [5]. Даний метод зазвичай реалізується введенням в топку котла газів рециркуляції з температурою 300–400 °С, які відбираються перед повітрянагрівачем котла. Для котельних установок, які не обладнані повітрянагрівачами, рециркуляція здійснюється шляхом додаванням до дуттьового повітря частини відхідних газів котла [5]. При цьому без застосування спеціальних заходів за низьких температур навколишнього середовища можливе обмерзання повітроводів та вентилятора котельної установки [6, 7]. Тобто надійна експлуатація котельної установки не може бути забезпечена в усіх режимах котла.

Мета роботи і постановка завдань досліджень

Мета роботи полягає у дослідженні тепловологісних режимів експлуатації повітропідвідних трактів котельних установок з системами рециркуляції відхідних газів у дуттьове повітря.

Для досягнення мети необхідно було вирішити такі завдання дослідження:

Табл. 1. Основні характеристики котла в номінальному режимі

Найменування параметра	Значення
Теплопродуктивність МВт	2,0
Коефіцієнт надлишку повітря	1,1
Температура води на вході, °С	70
Температура води на виході, °С	95
ККД, %	81,6
Витрата природного газу, м ³ /год	224
Температура відхідних газів, °С	160

- виконати тепловий розрахунок котла з рециркуляцією його відхідних газів у дуттьове повітря;
- дослідити тепловологісні показники суміші холодного повітря і рециркульованих димових газів.

Методика проведення досліджень.

Використовувалися відомі методи теплового розрахунку котельних установок та дані експериментальних досліджень, отриманих авторами [7–9].

Розрахункові дослідження виконувались для газотрубного опалювального котла теплопродуктивністю 2 МВт, що працює на природному газі. Характеристики котла в номінальному режимі експлуатації наведено в табл.1. ККД котла розраховувався за вищою теплоотою згоряння палива.

Технологія рециркуляції димових газів реалізовувалась шляхом введення у газопальниковий пристрій котла частини відхідних газів у суміші з дуттьовим повітрям. На рис. 1 зображено принципову схему такої котельної установки.

Котельна установка містить котлоагрегат з газопальниковим пристроєм, сполучений відвідним газоходом з димовою трубою через димосос; газопальниковий пристрій сполучений повітроводом з атмосферою через вхідний патрубок і вентилятор. Відвідний газохід з'єднаний газоходом рециркуляції з ділянкою повітроводу на всмоктувальній стороні вентилятора. Технічна реалізація котельної установки передбачає, що її котлоагрегат підключений до споживача теплової енергії подавальним трубопроводом і зворотним трубопроводом з мережним насосом з утворенням водяного циркуляційного контуру системи тепlopостачання.

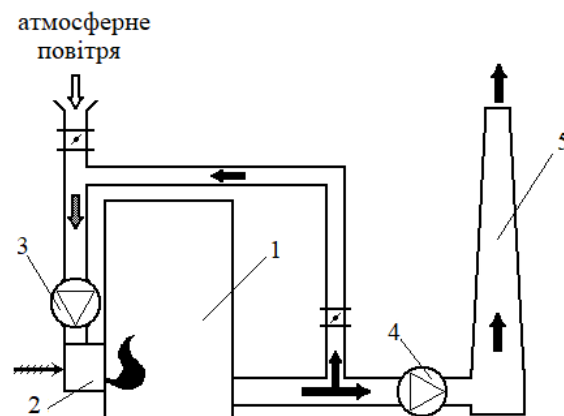


Рис. 1. Принципова схема котельної установки з системою рециркуляції димових газів:

1 – котел; 2 – газопальниковий пристрій; 3 – дуттьовий вентилятор; 4 – димосос; 5 – димова труба;
 → природний газ; → димові гази від котла; ⇌ атмосферне повітря; ⇌ газоповітряна суміш

При виконанні досліджень відносна теплова продуктивність котла K коливалась в межах від 100 до 30% протягом опалювального періоду згідно зі зміною температури атмосферного повітря від -30 до $+10$ °C. Дослідження здійснювались для системи опалення з розрахунковою температурою навколишнього середовища -30 °C та температурним перепадом теплоносія $\Delta t_0 = 25$ °C.

Тепловий розрахунок котла виконувався у різних режимах його експлуатації при частках σ рециркуляції димових газів від 10 до 20% для двох розглянутих в роботі ситуацій, а саме: при дотриманні витрати газу на котел в кожному режимі на рівні її значення без застосування системи рециркуляції ($B_n = \text{const}$), або при дотриманні теплового графіка котельні згідно необхідних температур нагріваної прямої води котла ($T_{np}^b = \text{const}$). Визначалися адіабатні температури горіння в топковому просторі котла та температури $t_{\text{сум}}$ суміші повітря та рециркульованих газів і її точки роси $t_{\text{р}}^{\text{сум}}$ за різних часток σ відбору димових газів для обох розглянутих варіантів. Для розрахунку вказаних тепловолігисних показників використовувались результати теплового розрахунку котла щодо значення температури відхідних газів та їхнього вологовмісту, а також дані щодо вологовмісту

повітря відповідно до температур навколишнього середовища протягом опалювального періоду.

В роботі для виконання розрахункових досліджень теплових та вологісних режимів котельних установок з системами рециркуляції димових газів було створено відповідне програмне забезпечення. Результати виконаних досліджень щодо адіабатної температури горіння при витраті B_n природного газу на котел, що відповідає в кожному режимі його значенню без застосування рециркуляції ($B_n = \text{const}$), наведено на рис. 2.

Результати досліджень свідчать, що введення газів рециркуляції в топковий простір котла за даних умов зумовлює зниження на $150\text{--}250$ °C адіабатної температури горіння $t_{\text{ад}}$ через необхідність витрати теплоти палива на підігрівання введеного баласту. І чим більша частка рециркуляції σ , тим нижчий рівень зазначеної температури.

За результатами досліджень рециркуляція димових газів зумовлює також невеликі зміни в температурі відхідних газів котла $t_{\text{від}}^{\text{г}}$. В табл. 2 наведено відповідні дані за умов збереження витрати газу на котел на рівні значення цієї витрати без застосування рециркуляції, тобто за умови $B_n = \text{const}$.

Таблиця 2. Температура відхідних газів $t_{\text{від}}^{\text{г}}$ котла в залежності від температури навколишнього середовища та часток σ рециркульованих газів при $B_n = \text{const}$

Частка рециркуляції σ , %	Температура відхідних газів $t_{\text{від}}^{\text{г}}$, °C при різних значеннях температури навколишнього середовища $t_{\text{ср}}$, °C								
	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10
0	159,9	148,0	138,8	128,9	118,6	107,1	94,5	80,6	64,8
10	158,4	149,7	140,3	130,6	120,3	108,9	96,5	82,6	66,9
15	158,9	150,0	140,9	131,3	121,0	109,7	97,3	83,5	67,8
20	159,3	150,5	141,4	131,8	121,7	110,4	98,0	84,2	68,8

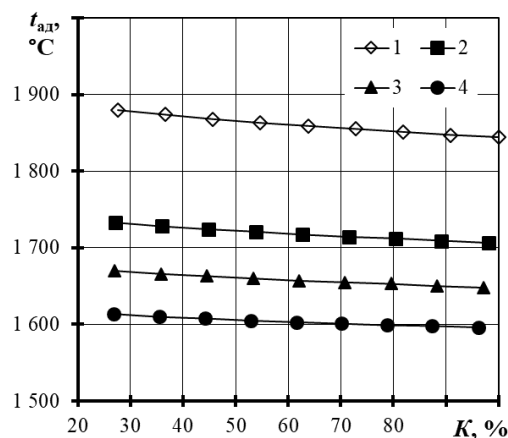


Рис. 2. Залежність адіабатної температури горіння $t_{\text{ад}}$ від відносного теплового навантаження K котла при різних частках σ рециркульованих газів та $B_n = \text{const}$: 1 – $\sigma = 0$ %; 2 – 10 %; 3 – 15 %; 4 – 20 %

Як видно з табл. 2, за умови $B_{\text{п}} = \text{const}$ температура $t_{\text{від}}^{\text{г}}$ відхідних газів котла дещо знижується ($\approx 0,5^{\circ}\text{C}$) у номінальному режимі (при найнижчій температурі атмосферного повітря опалювального сезону) та підвищується (до $4,0^{\circ}\text{C}$) при мінімальному навантаженні котла ($\approx 30\%$), що відповідає найвищій температурі повітря вказаного сезону. Виконані теплові розрахунки також засвідчили, що за умови $B_{\text{п}} = \text{const}$ знижується температура $T_{\text{в}}^{\text{гп}}$ нагріваної в котлі прямої води системи теплопостачання порівняно з необхідною за розрахунковим тепловим графіком котельні. Тому проведено відповідні теплові розрахунки котла при дотриманні рівня температури нагріваної в ньому води згідно з тепловим графіком ($T_{\text{в}}^{\text{гп}} = \text{const}$). В табл. 3 наведено дані щодо температурних показників відхідних газів за умови $T_{\text{в}}^{\text{гп}} = \text{const}$. Як показали результати, за цієї умови збільшується витрата газу на котел $B_{\text{п}}$. Результати також свідчать, що при $T_{\text{в}}^{\text{гп}} = \text{const}$ температура відхідних газів за котлом підвищується на $1,4 - 4,7^{\circ}\text{C}$ через збільшення витрати газу.

Визначено також значення вологовмісту відхідних газів котла за умов застосування рециркуляції димових газів (табл. 4). Слід зауважити, що цей вологовміст не залежить від частки рециркулювання цих газів σ , а визначається лише режимом експлуатації котла.

З використанням отриманих даних щодо температури та вологовмісту відхідних газів визначено тепловологісні характеристик повітрягазової суміші, що надходить в топку котла, для двох розглянутих ситуацій. Рисунок 3 ілюструє результати зіставлення вказаних характеристик для кожної з розглянутих часток σ .

Таблиця 3. Температура відхідних газів $t_{\text{від}}^{\text{г}}$ котла в залежності від температури навколишнього середовища та часток σ рециркульованих газів при $T_{\text{в}}^{\text{гп}} = \text{const}$

Частка рециркуляції σ , %	Температура відхідних газів $t_{\text{від}}^{\text{г}}$, $^{\circ}\text{C}$ при різних значеннях температури навколишнього середовища $t_{\text{св}}$, $^{\circ}\text{C}$								
	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10
0	159,9	148,0	138,6	128,6	119,3	110,0	99,7	88,3	75,6
10	159,3	150,3	140,9	130,9	121,9	112,6	102,4	91,0	78,1
15	160,3	151,3	142,0	132,0	123,0	113,7	103,5	92,2	79,2
20	161,3	152,3	142,9	133,0	124,0	114,8	104,6	93,2	80,3

Таблиця 4. Вологовміст відхідних газів $X_{\text{від}}^{\text{г}}$ в різних режимах експлуатації котла в залежності від температури навколишнього середовища

Частка рециркуляції σ , %	Вологовміст вихідних газів $X_{\text{від}}^{\text{г}}$, г/кг с.г. при різних значеннях температури навколишнього середовища $t_{\text{св}}$, $^{\circ}\text{C}$								
	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10
0-20	139,6	139,6	139,7	139,7	139,8	139,9	140,0	140,0	140,4

Як видно з наведених даних, температура $t_{\text{сум}}$ суміші газів та її точка роси $t_{\text{сум}}^{\text{р}}$ підвищується при застосуванні рециркуляції газів і тим більше, чим більша частка рециркулювання σ . Відмінності у значеннях $t_{\text{сум}}$ та $t_{\text{сум}}^{\text{р}}$ для двох розглянутих ситуацій (з $B_{\text{п}} = \text{const}$ та $T_{\text{в}}^{\text{гп}} = \text{const}$) є незначними через невеликі розбіжності в температурах відхідних газів котла в цих ситуаціях (див. табл. 2, 3).

Результати виконаних досліджень засвідчили також, що в усіх режимах котла, які відповідають його теплопродуктивності в залежності від температури навколишнього середовища, спостерігається зниження температури суміші $t_{\text{сум}}$ нижче точки роси $t_{\text{сум}}^{\text{р}}$. Тобто, в усіх режимах котла матиме місце конденсатотворення на внутрішніх поверхнях підвідних повітроводів та у вентиляторі. А при температурах навколишнього середовища, менших за 0°C , коли температура повітрягазової суміші $t_{\text{сум}}$ приймає від'ємні значення, можливе обмерзання вказаних поверхонь, що розміщені на відкритих майданчиках.

Наведені на рис. 3 результати досліджень свідчать, що зниження температури повітрягазової суміші $t_{\text{сум}}$ нижче 0°C при $\sigma = 10\%$ відбувається за відносних навантажень котла $K > 70\%$, при $\sigma = 15\%$ відповідно за $K > 80\%$, а при $\sigma = 20\%$ мінусові значення $t_{\text{сум}}$ не спостерігаються. При експлуатації повітроводів та вентиляторів на відкритих площадках через випадення конденсату на внутрішніх поверхнях вказаних елементів котельних установок відбуватиметься обмерзання цих поверхонь при зниженні їх температури $t_{\text{п}}$ нижче 0°C . Температура $t_{\text{п}}$ внутрішньої поверхні застосовуваних повітропроводів залежить від умов теплообміну цієї

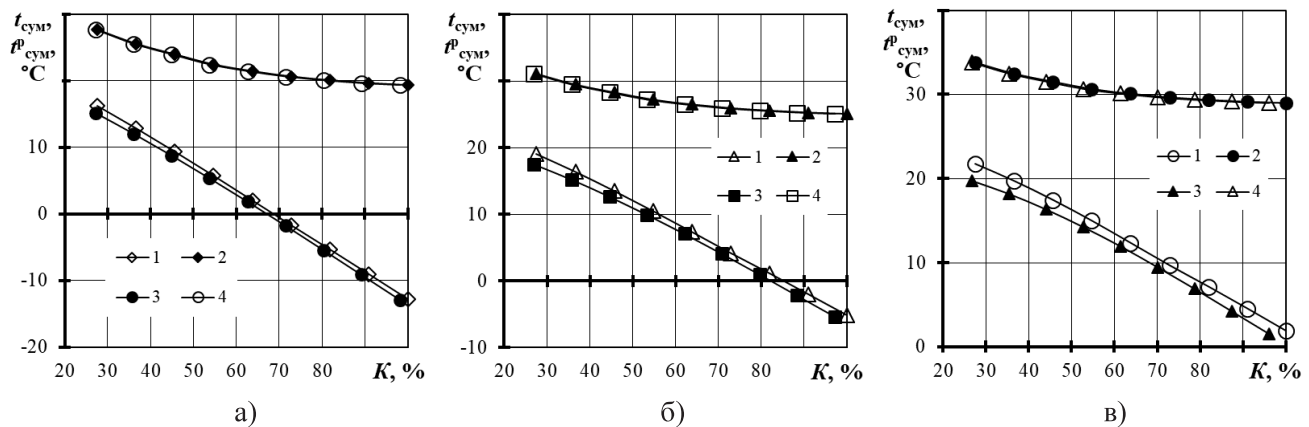


Рис. 3. Залежність від відносного навантаження котла K температури $t_{\text{сум}}$ (1, 3) та точки роси $p_{\text{сум}}$ (2, 4) суміші дуттьового повітря та рециркульованих газів при різних частках σ рециркуляції газів від котла при $T_{\text{г}}^{\text{п}} = \text{const}$ (1, 2) та при $B_{\text{н}} = \text{const}$ (3, 4): а) $\sigma = 10\%$; б) $\sigma = 15\%$; в) $\sigma = 20\%$

поверхні з навколишнім середовищем, який здебільшого визначається режимом роботи котла, конструкційними особливостями повітроводів та їхнім розміщенням. Через втрати тепла в навколишнє середовище $t_{\text{п}}$ є зазвичай нижчою температури суміші $t_{\text{сум}}$ і через випадення конденсату у повітроводах їхнє обмерзання наступатиме при менших навантаженнях котла K і вищих частках рециркуляції газів σ , зокрема і при $\sigma = 20\%$.

Отримані дані свідчать, що для запобігання конденсатоутворенню і обмерзанню поверхонь підвідних повітроводів котла необхідно застосовувати заходи щодо підвищення температури газоповітряної суміші на величину не меншу $\Delta t_{\text{сум}} = 15 - 35^\circ\text{C}$ в залежності від режиму роботи котла та часток рециркуляції σ . Причому більші рівні підвищення $\Delta t_{\text{сум}}$ відповідають нижчим температурам навколишнього середовища і більшим навантаженням котла.

Висновки.

1. Виконано теплові розрахунки опалювального котла з системою рециркуляції його відхідних газів в топковий простір в суміші з дуттьовим повітрям. Встановлено закономірності зміни адиабатної температури горіння та температури відхідних газів котла в залежності від величин часток рециркуляції димових газів та теплового навантаження котла в різних режимах його експлуатації протягом опалювального періоду. Показано, що введення газів рециркуляції з дуттьовим повітрям в топковий простір котла викликає:

- суттєве зниження (на $150-250^\circ\text{C}$) адиабатної температури горіння $t_{\text{ад}}$ через необхідність витрати теплоти палива на підігрівання введених баластних газів. І чим більша частка цих газів, тим нижчий рівень зазначеної температури;

- невелике підвищення ($\approx 1,4 - 4,7^\circ\text{C}$) температури відхідних газів котла $t_{\text{від}}^{\text{г}}$ за умови дотримання температури прямої води котла відповідно до теплового графіка котельні, що викликає необхідність збільшення витрати палива на котел;

- незначне зниження ($\approx 0,5^\circ\text{C}$) температури відхідних газів котла у номінальному режимі та підвищення цієї температури (до $4,0^\circ\text{C}$) при мінімальному навантаженні котла ($\approx 30\%$) за умов збереження витрати газу, що відповідає в кожному режимі його значенню без застосування рециркуляції.

2. Встановлено закономірності зміни тепловологісних характеристик (температури та точки роси) суміші рециркульованих газів і повітря в різних режимах котла протягом опалювального періоду та за різних часток рециркульованих газів. Встановлено, що:

- застосування системи рециркуляції призводить до зниження температури повітрогазової суміші нижче її точки роси у всіх режимах експлуатації котла;

- у деяких режимах відбувається зниження температури суміші нижче 0°C , що зумовлює обмерзання поверхонь повітроводів, які експлуатуються на відкритих майданчиках.

- для запобігання конденсатоутворенню та обмерзанню повітроводів необхідно застосовувати заходи щодо підвищення температури газоповітряної суміші на величину не меншу за $\Delta t_{\text{сум}} = 15 \dots 35^\circ\text{C}$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Михайленко В.С., Щербінін В.А., Леценко 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., Дубошій 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., Сірий О.А., Абдулін М.З. Возможности 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. Епифанов А.А., Дымо В.В., Пацурковский П.А., Язловецкий А.В. Влияние рециркуляции дымовых газов на технические и экологические показатели работы судового вспомогательного котла. Shipbuilding & marine infrastructure. 2020. №2 (14). С. 4–16. DOI [https://doi.org/10.15589/smi2020.2\(14\).1](https://doi.org/10.15589/smi2020.2(14).1)
5. Кобзарь С.Г., Халатов А.А. Снижение выбросов оксидов азота в газовых котлах методом рециркуляции дымовых газов. Промышленная теплотехника. 2009. Т. 31, № 4. С. 5–11.
6. Евсеев Г.А., Евсеев А.Г., Капичников А.А., Ткач В.А. Система рециркуляции дымовых газов водогрейных теплофикационных котлов ПТВМ-50. URL: <http://www.rnkt.ru/year/2006/lib/1-249.pdf>
7. 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>

OPERATION FEATURES OF ENVIRONMENTALLY EFFICIENT BOILER PLANTS OF MUNICIPAL THERMAL POWER ENGINEERING

Fialko N.M.¹, Navrodska R.², Shevchuk S.³, Abdulin M.⁴

¹Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Head of Department, Professor, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, Senior Research Scientist, orcid.org/0000-0001-7476-2962, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

³PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Researcher, orcid.org/0000-0002-0430-7144, e-mail: s_aleshko@ukr.net

⁴Dr. Sci. (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057; Dr. Sci. (Engin.), Ukraine, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Prosp. Peremohy, Kyiv, 03056, Ukraine, Professor, orcid.org/0000-0001-9900-7314, e-mail: mzabdulin@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.6>

The work is devoted to research on the improvement of thermal energy production technologies in gas-consuming heating boiler installations while improving their environmental performance and increasing the operation reliability. The work purpose is to study the heat and humidity modes of the air-supply ducts of boiler plants with exhaust gases recirculation systems into the blown air. The main objectives of the study are: to determine the thermal parameters of a heating boiler with a 2 MW heating capacity with a exhaust gases recirculation system mixed with blown air into its furnace space under conditions of using heat recovery technologies and without them; determination and analysis the heat and humidity parameters of this mixture in different operating modes of boiler plants. Known thermal calculation methods of boiler plants and data from our own experimental studies of heat transfer during deep cooling of boiler plant exhaust gases were used. The thermal calculation results of the heating boiler with a system for exhaust gas

recirculation into its furnace space mixed with blown air are presented. The regularities of changes in the adiabatic combustion temperature and heat-humidity characteristics of the above mixture depending on the boiler heat load in different its operation modes during the heating period and the share of flue gas recirculation from 10 to 20 % were established. The research results show that the introduction of recirculation gases leads to a decrease by 150 – 250 °C of the adiabatic combustion temperature t_{ad} due to the need to consume fuel heat for heating the introduced ballast and the greater of the recirculation share σ the lower the level of the indicated temperature. The research results also showed that gas recirculation causes insignificant (in the range of 0.5 – 4.7 °C) changes in the temperature of the boiler exhaust gases. Based on the data obtained, the change regularities in the heat-humidity characteristics (temperature and dew point) of the mixture of recirculated gases and air in different boiler operating modes during the heating period and under the studied recirculation shares were established. It is shown that recirculation causes condensate formation on the surfaces of air ducts in all operating modes of boiler and in some modes their icing is possible. To prevent these negative phenomena, it is necessary to apply measures to increase the temperature of the gas-air mixture by a value not less than $\Delta t_{sum} = 15 - 35$ °C.

References 7, tables 4, figures 3.

Keywords: gas-consuming boiler plants, flue gases, recirculation, condensation formation in air ducts.

1. *Mikhailenko V.S., Shcherbinin V.A., Leshchenko V.V., Kharchenk R.Yu., Lozhechnikova N.V.* [Modeling the process of hazardous emissions formation in the exhaust gases of ship's steam boilers]. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*. 2020. V.10, №3–4. P. 154–166. DOI 10.15276/imms.v10.no 3-4.154 (in Ukr.)

2. *Sigal I.Ya., Duboshiy A.N., Sigal O.I., Smikhula A.V.* [Increase of Smoked Gases Recirculation Influence on Nitrogen Oxides Emission from Power Plant Boilers Reduction]. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2010. №1. P.48–52. (in Rus.)

3. *Horban K., Siryi O., Abdulin M.* [Jet-niche technology influence potential on the economic and operating parameters of the fire-engineering equipment]. *NTU "KhPI" Bulletin: "Power and heat engineering processes and equipment"*. 2021. №2(6). P. 10–14. doi: 10.20998/2078-774X.2021.02.02 (in Ukr.)

4. *Yepifanov A.A., Dymo B.V., Patsurkovskiy P.A., Yazlovetskiy A.V.* [Influence of flue gases recirculation on technical and ecological indicators of ship auxiliary boiler performance]. *Shipbuilding & marine infrastructure*. 2020. №2 (14). P. 4–16. DOI [https://doi.org/10.15589/smi2020.2\(14\).1](https://doi.org/10.15589/smi2020.2(14).1) (in Rus.)

5. Kobzar S.H., Khalatov A.A. Snizhenie vybrosov oksidov azota v gazovykh kotlakh metodom retsirkuliztsii dymovykh gazov [Reduction of nitrogen oxide emissions in gas-fired boilers by flue gas recirculation]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering]. 2009. V. 31, № 4. P. 5–11. (in Rus.)

6. Yevseev H.A., Yevseev A.H., Kapichnikov A.A., Tkach V.A. Sistema reysirkuliyatsii dymovykh gazov vodohreynykh teplofikatsionnykh kotlov STWM-50 [Flue gas recirculation system of hot water heating boilers STWM-50]. URL: <http://www.rnkt.ru/year/2006/lib/1-249.pdf> (in Rus.)

7. Fialko N.M., Navrodska R.O., Shevchuk S.I., Stepanova A.I., Gnedash G.O. [Improving the reliability of boiler plants with recirculation and heat recovery of exhaust gases]. *International Scientific Journal “Internauka”*. 2022. №14. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-14-8419> (in Ukr.)

Отримано 07.02.2023

Received 07.02.2023