

УДК 662.99:621.184.5

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК З РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ ДИМОВИХ ГАЗІВ

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-itff@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: mzabduлин@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2023.7>

Наведено результати розрахунків опалювальної котельної установки з рециркуляцією та теплоутилізацією димових газів. Встановлено закономірності зміни тепловологісних показників суміші підігрітого в системі теплоутилізації повітря та рециркульованих газів в залежності від теплового навантаження котла, способу відбору цих газів та їхньої частки в суміші. Визначено рівні приросту ККД котла за умов застосування запропонованої теплоутилізаційної системи.

The calculation results of a heating boiler plant with recirculation and heat recovery of flue gas are presented. The change regularities of the mixture thermal and humidity parameters of air heated in the heat recovery system and recirculation gases depending on the heat load boiler, the method of selecting these gases and their part in the mixture was established. The levels of increase in the boiler efficiency under the conditions of using the proposed heat recovery system are determined.

Бібл. 9, табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: газоспоживальні котельні установки, димові гази, рециркуляція, теплоутилізація, запобігання конденсації.

q – відносне навантаження котла, %;

T, t – температура, °С;

Δt – перепад температур, °С;

$\Delta \eta$ – приріст ККД, °С;

σ – частка рециркуляції, %;

Індекси:

від – відхідний;

г – гази;

нс – навколишнє середовище;

о – опалення;

пер – перевищення;

р – роса;

рез – результуючий;

с – суміш.

Вступ

Одним із ефективних способів екологізації газоспоживальних котельних установок є рециркуляція частини продуктів спалювання котла в його топковий простір. Рециркуляція може забезпечувати зниження до 90 % викидів NOx у вказаних установках [1–4]. Зменшення концентрації оксидів азоту NOx пояснюється зниженням температури горіння завдяки зменшенню швидкості ланцюгових реакцій внаслідок наявності інертних газів і зниження концентрацій реагуючих речовин. Найбільший ефект зниження утворення оксидів азоту досягається при потраплянні всього обсягу рецир-

кульованих газів в зону активного горіння у разі повного їх попереднього перемішування з дуттьовим повітрям.

Технологія рециркуляції димових газів широко застосовується і всебічно обґрунтована для котельних установок великої теплопродуктивності. Незначний досвід запровадження технології рециркуляції димових газів для котлів малої та середньої потужності виявив низку специфічних проблем, відсутніх в котельних установках великої теплопродуктивності, оснащених повітрянагрівачами. А саме, в котлах зменшеної теплової потужності на певних режимах їх роботи спостерігається конденсація вологи та обмерзання

повітропроводів і дуттьових вентиляторів, порушення режимів горіння і в цілому втрата робоздатності такої екологієфективної установки [3, 5]. До того ж, рециркуляція димових газів призводить до перевитрат палива (до 3 %) через зниження температури продуктів спалювання [2, 6].

Використання для котельних установок з рециркуляцією димових газів новітніх теплоутилізаційних систем, призначених для нагрівання тепломережної води та дуттьового повітря, може забезпечити відсутність вказаних проблем та недоліків.

Мета роботи і постановка завдань досліджень

Мета роботи полягає у підвищенні теплової ефективності екологієфективних опалювальних котельних установок та забезпеченні запобігання конденсації в їхніх повітропідвідних трактах шляхом застосування комбінованих систем теплоутилізації, оснащених повітронагрівачами.

Для досягнення мети необхідно було вирішити такі завдання дослідження:

- виконати тепловий розрахунок котла з рециркуляцією його відхідних газів у дуттьове повітря за умов використання комбінованих систем;
- дослідити тепловолінійні показники суміші нагрітого повітря і рециркульованих димових газів;
- визначити рівні підвищення ККД котельних установок з пропонованими системами теплоутилізації.

Методика проведення досліджень.

Дослідження базувались на використанні відомих методів теплового розрахунку котлів [7] та методики, розробленої в Інституті технічної теплофізики НАН України, при визначенні коефіцієнтів теплообміну в теплоутилізаторах комбінованих систем з глибоким охолодженням димових газів [8].

Схема теплоутилізаційної установки з рециркуляцією та теплоутилізацією димових газів наведена на рис. 1. Розглядалися різні варіанти відбору рециркульованих газів у дуттьове повітря. А саме: після котла, після водогрійного теплоутилізатора та після повітронагрівача.

Використовувався газоспоживальний опалювальний котел теплопродуктивністю 2 МВт. Тепловий розрахунок котла виконувався для тепломережного графіка з розрахунковою температурою навколишнього середовища $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ та температурним перепадом теплоносія $\Delta t_o = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. ККД котла, розрахований за вищою теплоотою згоряння палива, становив в номінальному режимі 81,6 %.

Водогрійним теплоутилізатором (див. рис. 1) слугував теплообмінник з пучком оребрених біметалевих труб (сталева основа та оребрення з алюмінію). Розглядалися труби з внутрішнім діаметром 25 мм, висотою оребрення 11 мм та міжреберним кроком 3,5 мм. Теплообмінна поверхня повітрогійного теплоутилізатора компонувався з пакетів пластин з нержавіючої сталі. Товщина пластин становила 2 мм, а крок між ними – 10 мм.

Теплові розрахунки виконувались в діапазоні зміни теплового навантаження котла від 100 до 30 % протягом опалювального періоду та за умови дотримання теплового графіка котельні згідно необхідних температур нагріваної прямої води котла ($T_{\text{в}}^{\text{пр}} = \text{const}$) за розглянутим температурним графіком. За цієї умови зменшується витрата газу на котел завдяки попередньому підігріванню зворотної тепломережної води та дуттьового повітря в пропонованій системі теплоутилізації. Частки σ рециркуляції димових газів змінювались від 10 до 20%.

Визначалися температури $t_{\text{від}}^{\text{г}}$ та вологовміст $X_{\text{від}}^{\text{г}}$ відхідних газів котла та температури $t_{\text{сум}}$ суміші повітря та

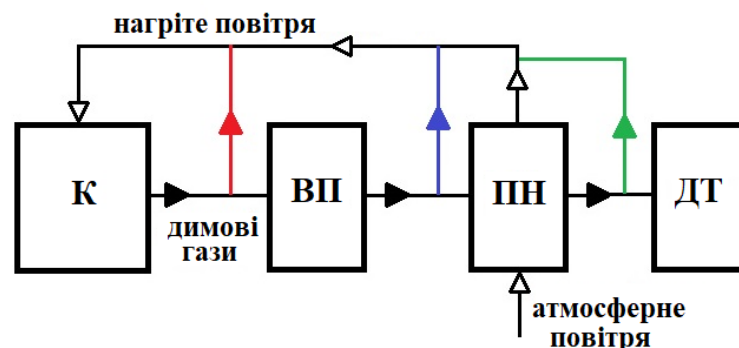


Рис.1. Реалізація способу рециркуляції димових газів за різних варіантів їх відбору в котельних установках з системами теплоутилізації К – котел; ВП – водопідігрівач;
→ - варіант 1; → - варіант 2; → - варіант 3.

рециркульованих газів і її точки роси $t_{\text{сум}}^p$ за різних часток σ відбору димових газів для усіх розглянутих варіантів (рис. 1). Для розрахунку вказаних тепловологісних показників використовувались результати теплового розрахунку котла, а також дані щодо вологовмісту повітря відповідно до температур навколишнього середовища протягом опалювального періоду [9]. Визначалися також рівні зниження ККД котла в результаті рециркуляції та рівні приросту ККД котла завдяки використанню пропонованої системи теплоутилізації.

Результати виконаних досліджень щодо температур $t_{\text{від}}^r$ відхідних газів котла з системою рециркуляції та теплоутилізації за різних варіантів відбору рециркульованих газів в котельній установці (рис. 1) наведено в табл. 1–3.

Як видно з наведених даних, температура відхідних газів $t_{\text{від}}^r$, як і зазвичай, змінюється суттєво в залежності від режиму експлуатації котла відповідно до температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$. Зміна способу відбору рециркульованих газів (рис. 1) виявила тенденцію до зниження температури $t_{\text{від}}^r$ із зменшенням температури рециркульованих газів (що відповідає варіантам 2, 3). Однак, зміна варіанта відбору газів для рециркуляції не призводить до суттєвих змін у температурі $t_{\text{від}}^r$ відхідних газів котла.

Що стосується впливу на значення температури $t_{\text{від}}^r$ відхідних газів котла частки рециркуляції σ , то вона викликає деякі зміни у цій температурі (на 0,5 – 4,4 °С). Причому величина зміни $t_{\text{від}}^r$ збільшується із збільшенням σ , підвищенням температури навколиш-

Таблиця 1. Температура відхідних газів $t_{\text{від}}^r$ котла в залежності від температури навколишнього середовища та часток σ рециркульованих газів за умов відбору газів рециркуляції після котла К (варіант 1)

Частка рециркуляції σ , %	Температура відхідних газів $t_{\text{від}}^r$, °С за різних значень температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$, °С						
	-20	-15	-10	-5	0	5	10
0	155,5	143,5	131,6	118,8	104,3	88,2	69,3
10	157,7	145,5	133,8	121,1	106,7	90,6	71,7
15	157,4	146,4	134,7	122,0	107,7	91,6	72,7
20	158,2	147,2	135,5	122,9	108,6	92,6	73,7

Таблиця 2. Температура відхідних газів $t_{\text{від}}^r$ котла в залежності від температури навколишнього середовища та часток σ рециркульованих газів за умов відбору газів рециркуляції після водопідігрівача ВП (варіант 2)

Частка рециркуляції σ , %	Температура відхідних газів $t_{\text{від}}^r$, °С за різних значень температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$, °С						
	-20	-15	-10	-5	0	5	10
0	155,5	142,3	130,6	117,9	103,4	87,1	68,2
10	157,6	144,2	132,6	120,0	105,6	89,4	70,3
15	155,9	145,0	133,4	120,9	106,5	90,3	71,3
20	156,5	145,7	134,1	121,7	107,3	91,2	72,1

Таблиця 3. Температура відхідних газів $t_{\text{від}}^r$ котла в залежності від температури навколишнього середовища та часток σ рециркульованих газів за умов відбору газів рециркуляції після повітрянагрівача ПН (варіант 3)

Частка рециркуляції σ , %	Температура відхідних газів $t_{\text{від}}^r$, °С за різних значень температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$, °С						
	-20	-15	-10	-5	0	5	10
0	155,5	141,6	129,9	117,4	102,9	86,8	67,9
10	157,5	143,4	131,9	119,4	105,1	89,0	70,1
15	154,9	144,2	132,7	120,3	106,0	89,9	71,0
20	155,5	144,8	133,4	121,0	106,8	90,8	71,8

нього середовища і зменшується із зниженням температури рециркульованих газів.

Результати виконаних досліджень засвідчили також, що відбір рециркульованих газів і їхня частка не впливає відчутно на рівень вологовмісту димових газів за котлом. Розрахунковий вологовміст цих газів змінюється від 139,7 до 140,4 г/кг с.г. в діапазоні зміни теплового навантаження котла від 100 до 30% відповідно до підвищення температури навколишнього середовища від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результати розрахунку тепловологісних показників суміші нагрітого дуттьового повітря та рециркульованих димових газів для усіх розглянутих варіантів відбору газів рециркуляції для суміші з дуттьовим повітрям наведено на рис. 2.

Наведені дані свідчать, що за умов застосування пропонованої системи теплоутилізації з використанням теплоутилізатора-повітрянагрівача ПН (рис. 1) тепловологісні показники суміші підігрітого дуттьового повітря та рециркульованих газів (температура $t_{\text{сум}}$ та точка роси $t_{\text{р сум}}$) відповідають необхідній умові ($t_{\text{сум}} > t_{\text{р сум}}$) для запобігання конденсації в повітропідвідних трактах котельних установок. Ця умова дотримується у всіх досліджуваних варіантах відбору димових газів. При цьому в повітрянагрівачах теплоутилізаційної системи досягається підігрівання повітря на $38 - 42\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 3 наведено дані щодо різниці між температурою та точкою роси повітрягазової суміші, що надходить в топку котла. Як видно, величина $\Delta t = t_{\text{сум}} - t_{\text{р сум}}$ змінюється від 12 до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ в залежності від режиму

котла, частки рециркуляції σ та варіанта відбору рециркульованих газів. Спосіб відбору рециркульованих газів за розглянутими варіантами (рис. 1) також впливає на величину Δt . Зокрема, зі зниженням температури рециркульованих газів Δt збільшується за мінімальних навантажень котла ($q \approx 30\%$) та зменшується за великих значеннях q .

Отримані результати досліджень засвідчили, що застосування пропонованої системи теплоутилізації забезпечуватиме запобігання конденсації, а відтак і обмерзанню поверхонь підвідних повітроводів котельних установок з рециркуляцією димових газів. До того ж, використання теплоутилізаційної системи також підвищуватиме ефективність використання палива в таких установках. На рис. 4, 5 наведено результати досліджень щодо рівнів зменшення та підвищення ККД в досліджуваних екологічно ефективних котельних установках з пропонованими системами теплоутилізації та без них.

Як видно з наведених даних, без застосування системи теплоутилізації за умов рециркуляції вихідних газів котла у дуттьове повітря ККД котла зменшується на $1,3 - 3,1\%$ в залежності від відносного навантаження котла q та частки рециркулювання газів σ . Використання пропонованої теплоутилізаційної системи забезпечує результуючий приріст ККД $\Delta\eta$ котельної установки на $1,0 - 3,8\%$ в залежності від значень q та σ . При цьому спосіб відбору рециркульованих газів (рис. 1) відносно мало впливає на значення приросту $\Delta\eta$ ($< 0,2\%$).

Отже, використання пропонованої комбінованої системи теплоутилізації забезпечує не лише сприятли-

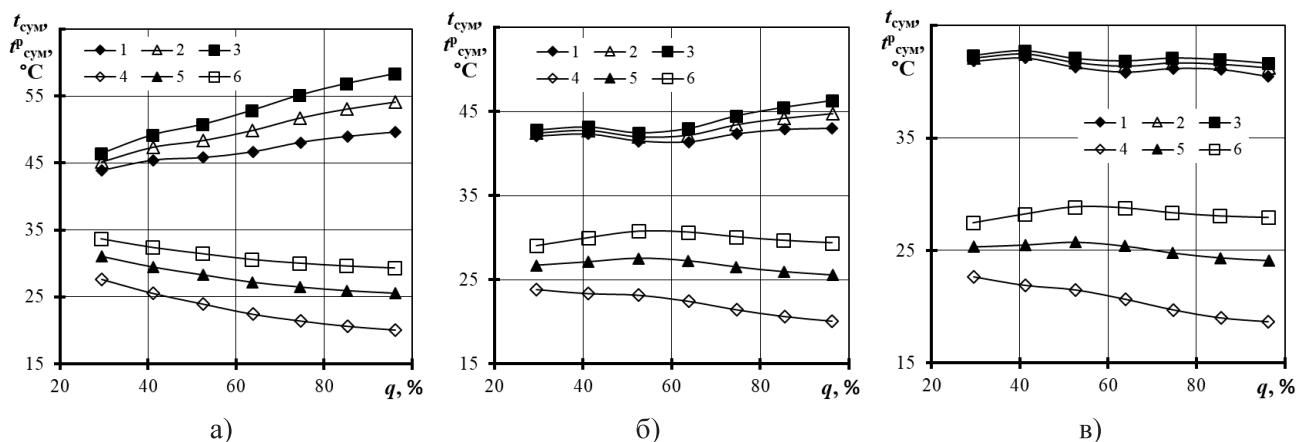


Рис. 2. Залежність від відносного навантаження котла q температури $t_{\text{сум}}$ (1-3) та точки роси $t_{\text{р сум}}$ (4-6) суміші дуттьового повітря та рециркульованих газів за різних часток σ рециркуляції газів від котла за умов відбору газів рециркуляції за котлом (а); за водопідігрівачем (б); за повітрянагрівачем (в).

1, 4 – $\sigma = 10\%$; 2, 5 – $\sigma = 15\%$; 3, 6 – $\sigma = 20\%$

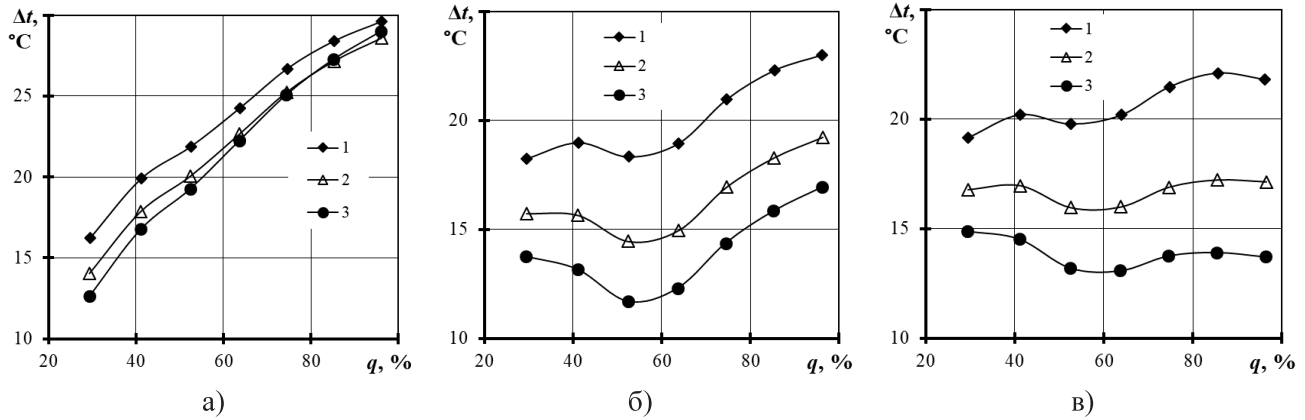


Рис. 3. Залежність від відносного навантаження котла q різниці Δt між температурою та точкою роси повітрягазової суміші за різних часток σ рециркуляції газів за умов відбору газів рециркуляції за котлом (а); за водопідігрівачем (б); за повітрянагрівачем (в).

1 – $\sigma = 10\%$; 2 – $\sigma = 15\%$; 3 – $\sigma = 20\%$

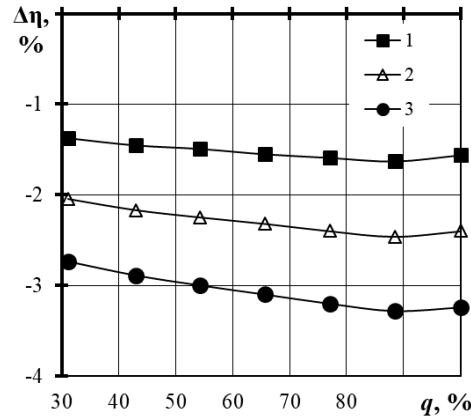


Рис. 4. Залежність від відносного навантаження котла q зменшення ККД котла $\Delta\eta$ за різних часток σ рециркуляції газів без застосування системи теплоутилізації:

1 – $\sigma = 10\%$; 2 – $\sigma = 15\%$; 3 – $\sigma = 20\%$

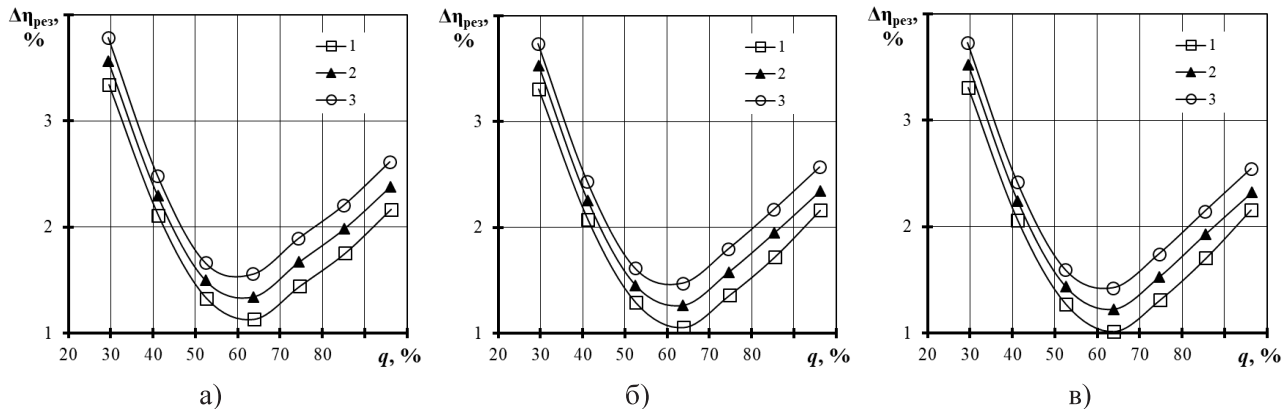


Рис. 5. Залежність від відносного навантаження котла q приросту ККД котла $\Delta\eta$ за різних часток σ рециркуляції газів у разі застосування пропонованої системи теплоутилізації за умов відбору газів рециркуляції за котлом (а); за водопідігрівачем (б); за повітрянагрівачем (в). 1 – $\sigma = 10\%$; 2 – $\sigma = 15\%$; 3 – $\sigma = 20\%$

вий тепловологісний режим повітропідвідних трактів розглянутої котельної установки і компенсує втрати теплоти на рециркуляцію димових газів, а також забезпечує заощадження палива шляхом підігрівання дуттьового повітря та зворотної тепломережної води перед надходженням цих теплоносіїв до котла.

Висновки.

1. Виконано теплові розрахунки опалювального котла з системою теплоутилізації та рециркуляції його відхідних газів в топковий простір в суміші з дуттьовим повітрям. Встановлено закономірності зміни тепловологісних показників цієї суміші за різних часток рециркуляції газів, в різних режимах роботи котла та варіантах відбору рециркульованих газів. Показано, що застосування пропонованої системи завдяки підігріванню повітря на 38 – 42 °С забезпечує запобігання конденсатуутворенню (а відповідно і обмерзанню) в повітропідвідних каналах котельної установки в усіх режимах її експлуатації протягом опалювального періоду за усіх розглянутих умов.

2. Визначено основні показники теплової ефективності котельних установок з системами рециркуляції (РЦ) димових газів у дуттьове повітря за умов використання комбінованих систем теплоутилізації (ТУ) відхідних газів та без них. Показано, що:

- застосування РЦ призводить до зменшення ККД котла на 1,3 – 3,1 % в залежності від його відносного навантаження q та частки рециркулювання димових газів від 10 % до 20 %;

- використання систем ТУ з нагріванням зворотної тепломережної води та дуттьового повітря за розглянутих умов забезпечує результуючий приріст ККД в межах 1,0 – 3,8 %.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Глуценко О. Л., Богданович, Д. В. Дослідження роботи промислових котельних агрегатів з метою розробки заходів щодо зниження шкідливих викидів у навколишнє середовище. Conference Proceedings of the 1st International Conference on Academic Research and Innovation. Dallas, USA, 13-15 January 2021. (pp. 9-17). https://ispic.ngo-seb.com/assets/files/1_conf_13_15.01.2021.pdf.

2. 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

3. Кисилиця А.О. Екологічне обґрунтування технологічних рішень модернізації обладнання котельної: дипломна робота магістра [Електронний ресурс] / Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». Харків, 2020. 84 с. URL: <http://dspace.library.khai.edu/xmlui/handle/123456789/843>

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. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Шевчук С.І., Абдулін М. З. Особливості експлуатації екологоефективних котельних установок комунальної теплоенергетики. Теплофізика та теплоенергетика. 2023. Т.45, №2, С. 55–62. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.6>

6. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Степанова А.І., Шевчук С.І., Сергієнко Р.В. Теплові аспекти експлуатації опалювальних котельних установок з теплоутилізацією та рециркуляцією димових газів. Енергетика і автоматика. 2023. №2. С. 5–17.

7. *Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / под ред. Н.В. Кузнецова.* М.: ЭКОЛИТ, 2011. 296 с.

8. 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>

9. Луна А. И. Кондиционирование воздуха. Основы теории. Современные технологии обработки воздуха. Одесса: ВМВ, 2010. 607 с. ISBN 978-966-413-146-6.

IMPROVING THE EFFICIENCY AND RELIABILITY OF BOILER PLANTS OPERATION WITH FLUE GAS RECIRCULATION

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/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com

⁴Dr. Sci. (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Researcher; Dr. Sci. (Engin.), 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.4.2023.7>

The paper the ways of improving the technologies of heat production in gas-consuming heating boiler plants to improve their environmental efficiency and increase the reliability of operation are investigated. The work purpose is to increase the thermal efficiency of environmentally efficient heating boiler plants and the prevention of condensate formation in their air-supply ducts by using complex heat recovery systems equipped with air heaters. The main objectives of the study are: determination the thermal parameters of a 2 MW heating boiler with a exhaust gas recirculation system into the blown air under the conditions of using complex heat recovery systems; determination and analysis the thermal and humidity parameters of the mixture of recirculation gases and blown air and the levels of increase the boiler units efficiency in different operating

modes of boiler plants with the proposed heat recovery systems. Known thermal calculation methods of boiler plants and data from our own experimental studies of heat transfer in heat recovery exchangers of complex systems during deep cooling of boiler plant exhaust gases were used. The thermal calculation results of a heating boiler with the exhaust gas recirculation system mixed with blown air using the proposed heat recovery system are presented. Based on the data obtained, the regularities of changes in the thermal and humidity characteristics (temperature, dew point, and their difference) of the mixture of recirculated gases and air in different boiler modes during the heating period, at the studied particles of recirculation (from 10 to 20%) and various flue gas selection options were established. The research results show that the use of the proposed system by heating the air by 38-42 °C prevents condensation and icing in the air-supply ducts of the boiler plant in all modes of its operation during the heating period under all considered conditions. It is shown that the use of the proposed heat recovery system increases the efficiency of fuel use in such installations. Thus, the use of heat recovery systems with heating of return heating water and blast air under the conditions under consideration provides a resulting increase of efficiency factor in the range of 1.0 - 3.8%.

References 9, tables 3, figures 5.

Keywords: gas-fired boilers, flue gases, recirculation, heat recovery, condensation prevention.

1. Hlushchenko O.L., Bohdanovich D.V. Study of operation of the industrial boiler units in order to develop measures to reduce harmful emissions into the environment. Conference Proceedings of the 1st International Conference on Academic Research and Innovation. Dallas, USA, 13-15 January 2021. (pp. 9-17). https://ispic.ngo-seb.com/assets/files/1_conf_13_15.01.2021.pdf.

2. Mikhaileiko 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.)

3. Kisilitsa A.O. Ekologichne obgruntuvannia tekhnolohichnykh rishen modernizatsii obladnannia kotelnoy [Ecological substantiation of technological solutions for the modernization of boiler plant equipment]: master's thesis / National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute". Kharkiv, 2020. 84 p. Available at <http://dspace.library.khai.edu/xmlui/handle/123456789/843> (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. *Fialko N.M., Navrodska R.O., Shevchuk S.I., Abdulin M. Z.* Osoblyvosti ekspluatatsii ekolohoeffektyvnykh kotelnykh ustanovok komunalnoi teploenerhetyky [Operation features of environmentally efficient boiler plants of municipal thermal power engineering]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2023. Vol. 45, №2, P. 55–62. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.6> (in Ukr.)
6. *Fialko N.M., Navrodska R.O., Stepanova A.I., Shevchuk S.I., Serhiienko R.V.* Teplovi aspekty ekspluatatsii opaliuvalnykh kotelnykh ustanovok z teploutylizatsiieiu ta retsyrkuliatsiieiu dymovykh gaziv [Thermal aspects of heating boiler plants operation with heat-recovery and exhaust gas recirculation]. *Energy and automation*. 2023. №2. P. 5–17. (in Ukr.)
7. *Kuznetsov N.V., Mitor V.V., Dubovsky I.E.* Teplovoy raschet kotelnykh agregatov. Normativnyy metod [Thermal calculation of boiler units. Normative method] / Ed. N.V. Kuznetsov. Moscow, Ekolite. 296 p.
8. *Navrodska R.A., Stepanova A.I., Shevchuk S.I., Gnedash G.A., Presich G.A.* Eksperimentalnoe issledovanie teploobmena pri glubokom okhlazhdenii produktov sgoraniia gazopotrebyaushchikh kotlov [Experimental investigation of heat-transfer at deep cooling of combustion materials of gas-fired boilers]. *Scientific Bulletin of UNFU*, 2018, vol. 28, no 6. P. 103–108. <https://doi.org/10.15421/40280620> (in Ukr.)
9. *Lipa A.I.* Konditsionirovanie vozdukha. Osnovy teorii. Sovremennye tekhnologii obrabotki vozdukha [Air conditioning. Theory basics. Modern air treatment technologies]. 2010. Odessa: BMB. ISBN 978-966-413-146-6. (in Rus.)

Отримано 21.06.2023

Received 21.06.2023

Прийнято до друку 23.11.2023
Accepted for publication 23.11.2023