

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК ЗА УМОВ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ТА ГЛИБОКОЇ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЇ ДИМОВИХ ГАЗІВ**

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

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

*С. І. Шевчук, кандидат технічних наук*

*Г. О. Сбродова, кандидат фізико-математичних наук, доцент*

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

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

*E-mail: [nmfialko@ukr.net](mailto:nmfialko@ukr.net)*

**Анотація.** *Наведено результати теплових розрахунків опалювальної котельної установки з рециркуляцією та теплоутилізацією димових газів. Досліджено теплову ефективність застосування комбінованої теплоутилізаційної системи, призначеної для нагрівання зворотної тепломережної води та дуттьового повітря. Розглянуто різні варіанти відбору димових газів для рециркуляції у дуттьове повітря, а саме: після котла, водогрійного теплоутилізатора та після повітрогрійного теплоутилізатора. Встановлено закономірності зміни температури відхідних газів різних елементів досліджуваної котельної установки у разі застосування розглянутих варіантів відбору рециркульованих газів за умов зміни їхньої частки в повітрогазовій суміші від 10 до 20 % та відносного теплового навантаження котла від 30 до 100 %. За вказаних умов визначено рівні приросту ККД в усіх елементах котельної установки та загального в разі використання пропонованої теплоутилізаційної системи та без неї. Показано, що використання цієї системи забезпечує глибоке охолодження димових газів в процесі теплоутилізації. І чим менша температура підмішуваних димових газів у розглянутих варіантах і вища частка рециркуляції газів, тим нижча температура відхідних газів за усіма елементами котельної установки. Приріст ККД котельної установки завдяки застосуванню пропонованої системи теплоутилізації змінюється від 3 до 5 % у водогрійному теплоутилізаторі та від 1 до 3 % – у повітрогрійному в залежності від навантаження котла і частки підмішуваних газів та варіанту їх відбору. Результуючий приріст ККД котельної установки з системою теплоутилізації та рециркуляції димових газів становить 1,4– 4,7 %.*

**Ключові слова:** *газоспоживальні котли, глибоке охолодження димових газів, підігрівання води і дуттьового повітря, приріст ККД*

**Актуальність.** *Ефективним способом покращення екологічних показників котельних установок шляхом зменшення емісії оксидів азоту є рециркуляція частини димових газів в топковий простір котла [1–4]. Застосування таких*

екологоефективних котельних установок пов'язано, як відомо, зі зниженням їхньої теплової ефективності [4–6]. Для комунальних котелень забезпечення теплової продуктивності вказаних екологоефективних установок на необхідному рівні згідно з потребами тепломережного графіка призводить до перевитрат палива в котлі. Використання опалювальних котельних установок із застосуванням традиційних теплоутилізаційних технологій з попереднім підігріванням зворотної тепломережної води перед надходженням її до котла може компенсувати вказані перевитрати [6]. Слід зазначити, що тепла ефективність традиційних технологій з водогрійними теплоутилізаторами суттєво залежить від режиму експлуатації котла протягом опалювального сезону. У холодний період цього сезону, коли згідно з тепломережним графіком температура  $t_{зв}$  зворотної води вища  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , у водогрійному теплоутилізаторі не реалізується глибоке охолодження димових газів і його ефективність мінімальна. В осінньо-весняний період опалювального сезону, коли  $t_{зв} < 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в теплоутилізаторі відбувається зниження температури димових газів нижче точки роси водяної пари. За цих умов настає конденсаційний режим експлуатації теплоутилізатора з використання теплоти фазового переходу для сконденсованої пари. Отже, тепла ефективність традиційних теплоутилізаційних систем є недостатньо високою через недовикористання теплового потенціалу скидної теплоти, особливо в холодний період року. Підвищення ефективності теплоутилізаційних систем реалізується шляхом докомпонування їх повітрогрійними теплоутилізаторами, призначеними для попереднього підігрівання дуттьового повітря перед надходженням його до котла. Для котлів з рециркуляцією димових газів рівень цього підігрівання повинен забезпечувати запобігання конденсації в повітропідвідних трактах котельної установки [7, 8]. У таких комбінованих теплоутилізаційних системах з нагріванням тепломережної води і дуттьового повітря можливі різні варіанти відбору димових газів для рециркуляції.

Актуальність цієї роботи полягає у вивченні та аналізі теплової ефективності опалювальних котельних установок з комбінованими системами теплоутилізації в

разі застосування технології рециркуляції димових газів у дуттьове повітря за різних способів відбору рециркульованих газів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідженням щодо застосування технологій глибокого охолодження димових газів опалювальних котлів присвячена значна кількість наукових праць, до прикладу [9]. Ці дослідження пов'язані з визначенням та аналізом як показників теплової ефективності теплоутилізаційних технологій, так і тепловологісних показників відхідних димових газів. Однак, отримані результати досліджень не стосуються котельних установок з рециркуляцією димових газів. У роботі [6] наведено дані щодо рівнів підвищення ККД котельних установок з додаванням рециркульованих газів у дуттьове повітря в разі застосування традиційних теплоутилізаційних систем з використанням водогрійних теплоутилізаторів для підігрівання зворотної тепломережної води. Застосування цих систем не лише компенсує втрати теплоти на реалізацію рециркуляції димових газів, а і забезпечує скорочення витрати палива. Теплова ефективність котельних установок завдяки застосуванню цих систем підвищується на 0,1 – 4,8 %. Однак, використання традиційних технологій не вирішує проблеми відвернення конденсатоутворення в повітропідвідних трактах котельних установок з рециркуляцією димових газів.

**Мета дослідження** – визначення показників теплової ефективності опалювальних котельних установок з комбінованими системами теплоутилізації за умов застосування технології рециркуляції димових газів у дуттьове повітря.

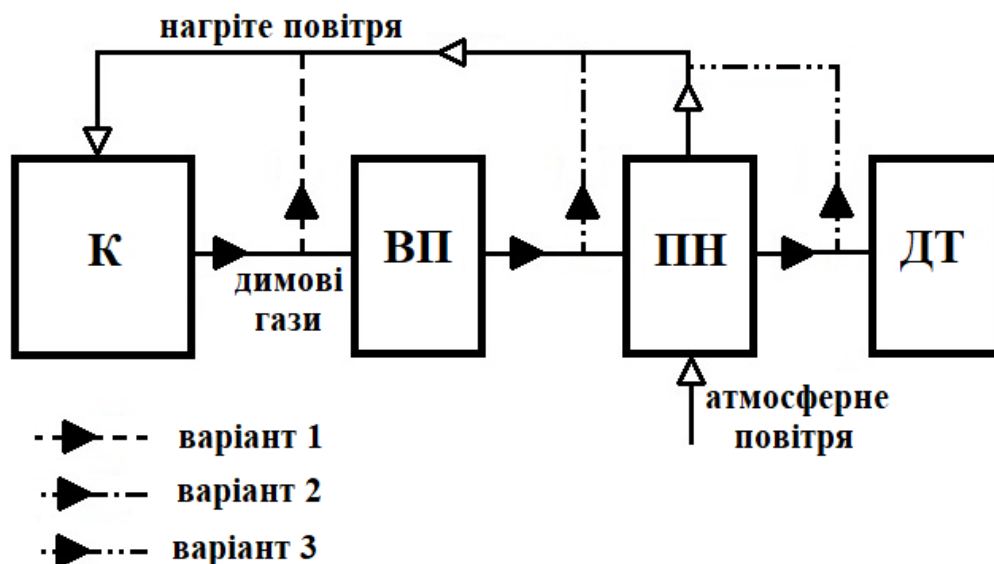
Для досягнення мети були поставлені *основні завдання дослідження*:

- виконати тепловий розрахунок газоспоживального водогрійного опалювального котла теплопродуктивністю 2МВт з рециркуляцією димових газів та комбінованою системою теплоутилізації, призначеною для нагрівання зворотної тепломережної води та дуттьового повітря;
- визначити для різних режимів котла протягом опалювального періоду глибини охолодження димових газів після різних елементів котельної установки за умов рециркуляції димових газів з різними їх частками в суміші з дуттьовим повітрям;

- встановити закономірності зміни приросту ККД котельної установки в різних елементах теплоутилізаційної системи та в цілому за різних режимів котла, а також частках і варіантах відбору рециркульованих газів в цій установці.

**Матеріали та методи дослідження.** Для визначення основних характеристик теплоутилізаційних систем використовувалися відомі методи теплового розрахунку котельних установок та експериментальних досліджень, отриманих авторами [10, 11].

Схема котельної установки з рециркуляцією димових газів і пропонованою комбінованою системою теплоутилізації наведена на рис. 1. У схемі застосовувався водогрійний теплоутилізатор – водопідігрівач ВП, теплообмінною частиною якого слугував пучок труб зі сталеву основою і алюмінієвим оребренням. Коефіцієнт оребрення становив 6,2. Повітрогрійний теплоутилізатор ПН компонувався з пучка сталевих пластин. Теплообмінна поверхня водопідігрівача ВП становила 39,6 м<sup>2</sup>, а повітронагрівача ПН – 34,0 м<sup>2</sup>.



**Рис.1 Реалізація способу рециркуляції димових газів для котельних установок з системами теплоутилізації при різних варіантах відбору газів рециркуляції:**

К – котел; ВП – водопідігрівач; ПН – повітронагрівач; ДТ – димова труба

Розрахункові дослідження виконувались для визначеного котла в діапазоні зміни його відносної теплопродуктивності протягом опалювального періоду від 30

до 100 %. Тепловий розрахунок котла виконувався для тепломережного графіка з розрахунковою температурою навколишнього середовища  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  та температурним перепадом теплоносія  $\Delta t_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . ККД котла, розрахований за вищою теплотою згоряння палива, становив в номінальному режимі 81,6 %.

Розглядалися три варіанти відбору рециркульованих газів у пропонованій системі теплоутилізації, а саме: після котла, після водогрійного теплоутилізатора та після повітрогрійного за умови дотримання теплового графіка котельні щодо необхідних значень температур прямої води котла ( $T_{\text{в}}^{\text{пр}} = \text{const}$ ). Досліджувані частки  $\sigma$  рециркуляції газів у повітря для горіння становили – 10, 15 і 20 %.

### Результати досліджень та їх обговорення.

*Встановлення закономірностей зміни температурних показників відхідних димових газів*

Результати розрахунку температур відхідних газів після котла, водогрійного теплоутилізатора та після повітронагрівача в залежності від температури навколишнього середовища протягом опалювального періоду для різних часток підмішування димових газів  $\sigma$  наведено в таблиці.

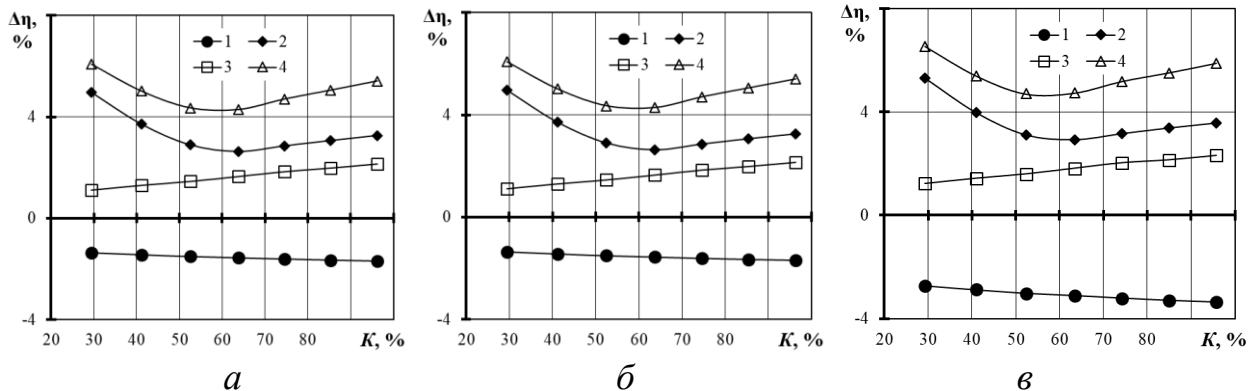
### Температура $t_{\text{від}}^{\Gamma}$ відхідних димових газів після різних елементів котельної установки в досліджуваних варіантах рециркуляції газів з різними частками $\sigma$

Елемент котельної установки	Значення $t_{\text{від}}^{\Gamma}$ в діапазоні зміни частки $\sigma$ від 10 до 20 % за різних варіантів рециркуляції газів при температурі навколишнього середовища $t_{\text{нс}},\text{ }^{\circ}\text{C}$			
	-20	-10	0	10
Варіант1				
котла	157,8-159,4	134,6-136,5	107,4-109,5	72,1-74,2
водопідігрівача	85,1-86,5	70,6-71,8	57,6-57,8	51,3-51,7
повітронагрівача	57,1-57,2	56,6-56,7	55,2-55,5	48,8-49,3
Варіант2				
котла	155,4-156,5	132,6-134,1	105,6-107,3	70,3-72,1
водопідігрівача	84,1-85,3	69,9-70,9	57,5-57,7	51,1-51,5
повітронагрівача	57,0-57,1	56,6-56,7	55,1-55,4	48,5-49,0
Варіант3				
котла	154,5-155,5	131,9-133,4	105,1-106,8	70,1-71,8
водопідігрівача	83,7-84,9	69,6-70,6	57,5-57,6	51,0-51,4
повітронагрівача	56,9-57,0	56,5-56,6	55,1-55,3	48,5-48,9

Як свідчать наведені дані, застосування комбінованої системи теплоутилізації забезпечує суттєве охолодження димових газів у процесі теплоутилізації, зокрема і нижче точки роси. Суттєвий вплив на глибину охолодження газів має режим роботи котла відповідно до температури навколишнього середовища. З підвищенням цієї температури температура відхідних газів за всіма елементами котельної установки значно знижується. Варіант відбору газів для їх підмішування в дуттьове повітря та частка цього відбору мають значно помітніший вплив. У розглянутих умовах чим менші значення температури підмішуваних газів і частки рециркуляції  $\sigma$ , тим нижча температура димових газів за усіма елементами котельної установки.

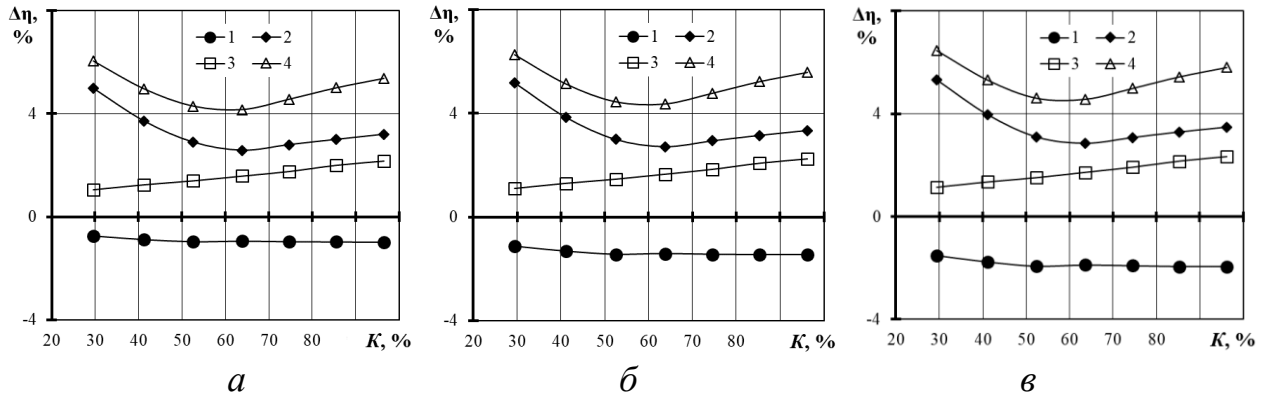
*Аналіз теплової ефективності котельної установки з рециркуляцією димових газів та пропонованою системою теплоутилізації*

Результати виконаних досліджень щодо рівнів зниження та підвищення ККД  $\Delta\eta$  котельної установки в різних елементах котельної установки з системою рециркуляції та теплоутилізації димових газів наведено на рис. 2 – 4.



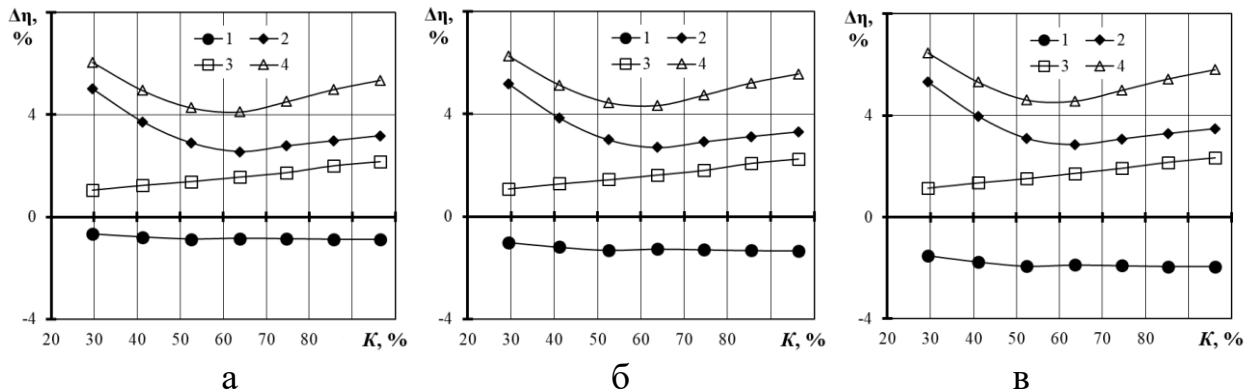
**Рис. 2. Залежність зміни ККД котла  $\Delta\eta$  в різних елементах котельної установки та загального від відносного теплового навантаження котла  $K$  за умов відбору рециркульованих газів з часткою 10 % (а); 15 % (б); 20 % (в) після котла (варіант 1).**

1 – зменшення  $\Delta\eta$  в котлі; 2 – приріст у водонагрівачі ВН; 3 – у повітрянагрівачі ПН; 4 – загальний приріст в котельній установці.



**Рис. 3. Залежність зміни ККД котла  $\Delta\eta$  в різних елементах котельної установки та загального від відносного теплового навантаження котла  $K$  за умов відбору рециркульованих газів з часткою 10 % (а); 15 % (б); 20 % (в) після водонагрівача (варіант 2).**

1 – зменшення  $\Delta\eta$  в котлі; 2 – приріст у водонагрівачі ВН; 3 – у повітрянагрівачі ПН; 4 – загальний приріст в котельній установці.



**Рис. 4. Залежність зміни ККД котла  $\Delta\eta$  в різних елементах котельної установки та загального від відносного теплового навантаження котла  $K$  за умов відбору рециркульованих газів з часткою 10 % (а); 15 % (б); 20 % (в) після повітрянагрівача (варіант 3).**

1 – зменшення  $\Delta\eta$  в котлі; 2 – приріст у водонагрівачі ВН; 3 – у повітрянагрівачі ПН; 4 – загальний приріст в котельній установці.

Як впливає з наведених даних, зниження ККД котла за умов рециркуляції димових газів повністю компенсовано шляхом застосування пропонованих теплоутилізаційних технологій, і, зокрема, з використанням водогрійного та повітрогрійного теплоутилізаційного устаткування. Так, загальний ККД котельної установки підвищується протягом опалювального періоду в межах 4,3 – 6,5 %, 4,2 – 6,5 % та 4,1 – 6,5 % відповідно за умов відбору рециркульованих газів від котла, водогрійного та повітрогрійного теплоутилізаторів. При цьому більші значення

приросту  $\Delta\eta$  відповідають часткам  $\sigma$  підмішування димових газів у дуттьове повітря.

Результати досліджень також засвідчили, що в повітронагрівачі досліджуваної теплоутилізаційної системи реалізується підігрівання повітря в межах 38 – 42 °С, що забезпечує запобігання конденсатоутворенню в повітропідвідних каналах котельної установки.

Отже, застосування пропонованих комбінованих теплоутилізаційних систем з використанням утилізованої теплоти для нагрівання зворотної води та повітря на горіння дозволяє підвищити ефективність та надійність 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. Використання для газоспоживальних водогрійних котлів пропонованих комбінованих систем теплоутилізації відхідних газів з нагріванням шляхом їхнього охолодження зворотної тепломережної води та дуттьового повітря забезпечує глибоке охолодження цих газів в усіх режимах експлуатації котла протягом опалювального періоду.

2. Використання пропонованих систем забезпечує приріст ККД котельної установки на 4,1 – 6,5 %. Результиуючий приріст ККД котла з системою теплоутилізації та рециркуляції становить 1,4– 4,7 %.

Результати виконаних досліджень будуть використанні в учбових процесах та при проектуванні теплоутилізаційних систем опалювальних котлів малої та середньої потужності з рециркуляцією димових газів у дуттьове повітря.

#### **Список використаних джерел**

1. Мельник О.В., Сорока В.В., Гаталяк М.Я. Методи зниження вмісту токсичних компонентів відпрацьованих газів судових дизелів. *Водний транспорт*. 2021. № 1(32). С. 64–74. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.1.32.08
2. Горбань К. С., Сірій О. А., Абдулін М. З. Можливості впливу струменевонішової 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

3. 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)

4. 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.

5. 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.

6. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Степанова А. 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. Мисак Й.С., Заяць М.Ф., Римар Т.І. Дослідження економічних показників роботи модернізованого РПП. *Енерготехнологии и ресурсосбережение*. 2017. №4. С. 27–34.

8. 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>

9. Фіалко Н. М. та ін. Комбіновані теплоутилізаційні системи для газоспоживальних котлів комунальної теплоенергетики: монографія. Київ: «Про формат». 2019. 192 с.

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

11. 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>

## References

1. Melnyk, A.V., Soroka, V.V., Gatalyak, M. Y. (2021). Metody znyzhennya vmistu toksychnykh komponentiv vidprats'ovanykh haziv sudnovykh dyzeliv [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

2. Horban, K., Siryi, O., Abdulin, M. (2021). Metody znyzhennya vmistu toksychnykh komponentiv vidprats'ovanykh haziv sudnovykh dyzeliv [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", 2(6), 10–14. doi: 10.20998/2078-774X.2021.02.02

3. Yepifanov, A.A., Dymo, B.V., Patsurkovskiy, P.A., Yazlovetskiy, A.V. (2020). Vliyaniye retsirkulyatsii dymovykh gazov na tekhnicheskiye i ekologicheskiye pokazateli raboty sudovogo vspomogatel'nogo kotla [Influence of flue gases recirculation on technical and ecological indicators of ship auxiliary boiler performance]. *Shipbuilding & marine infrastructure*, (14), 4–16. DOI [https://doi.org/10.15589/smi2020.2\(14\).1](https://doi.org/10.15589/smi2020.2(14).1)

4. Mikhailenko, V.S., Shcherbinin, V.A., Leshchenko, V.V., Kharchenk, R.Yu., Lozhechnikova N.V. (2020). Modelyuvannya protsesu utvorenniya shkidlyvykh vykydiv u vykhidnykh hazakh sudnovykh parovykh kotliv [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

5. Sigal, I.Ya., Duboshiy, A.N., Sigal, O.I., Smikhula A.V. (2010). Povysheniye effektivnosti vliyaniya retsirkulyatsii na snizheniye vybrosov oksidov azota kotlami elektrostantsiy [Increase of Smoked Gases Recirculation Influence on Nitrogen Oxides Emission from Power Plant Boilers Reduction]. *Energy Technologies & Resource Saving*.

6. Fialko, N., Navrodska, R., Shevchuk, S., Stepanova, A., Serhiienko R. (2022). Teplovi aspekty ekspluatatsiyi opalyval'nykh kotel'nykh ustanovok z teploutylizatsiyeyu ta retsyrkulyatsiyeyu dymovykh haziv [Thermal aspects of heating boiler plants operation with heat-recovery and exhaust gas recirculation]. *Energy and automation*, (2), 5–17. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-14-8419>

7. Mysak, Yo.S., Zayats, M.F., Rymar, T.I., (2017). Doslidzhennya ekonomichnykh pokaznykiv roboty modernizovanoho RPP [Researches of Economic Indicators of Work Modernized RPP]. *Energy Technologies & Resource Saving*, (4), 27-34.

8. Fialko, N.M., Navrodska, R.O., Shevchuk, S.I., Stepanova, A.I., Gnedash, G.O. (2022). Pidvyshchennya nadiynosti kotel'nykh ustanovok z retsyrkulyatsiyeyu ta teploutylizatsiyeyu dymovykh haziv [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>

9. Fialko, N. M., Navrodska, R. O., Presich, G. O., Gnedash, G. O., Shevchuk, S. I., Stepanova, A. I. (2019). Kombinovani teploutilizatsiini systemy dlia gazospozhyvalnykh kotliv komunalnoi teploenergetyky [Complex heat recovery systems for gas-fired boilers in municipal heat-power engineering]. Kyiv: «Pro format». 192 p.

10. Kuznetsov, N. V., Mitor, V. V., Dubovsky, I. E. (2011). Teplovoy raschet kotel'nykh agregatov. Normativnyy metod Thermal calculation of boiler units. Normative method. Moscow, Ekolite, 296.

11. Navrodska, R. A., Stepanova, A. I., Shevchuk, S. I., Gnedash, G. A., Presich, G. A. (2018). Eksperimental'noye issledovaniye teploobmena pri glubokom okhlazhdenii produktov sgoraniya gazopotreblyayushchikh kotlov [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>

## INCREASING THE EFFICIENCY OF BOILER PLANTS WITH FLUE GAS RECIRCULATION AND DEEP HEAT RECOVERY

*N. Fialko, R. Navrodska, S. Shevchuk, G. Sbrodova, A. Stepanova*

**Abstract.** *The thermal calculation results of a heating boiler plant with recirculation and heat recovery of flue gases are presented. The thermal efficiency of the complex heat recovery system use designed for heating the return heat-network water and blown air is investigated. Various options of flue gas selection for recirculation into the blowing air are considered, namely: after the boiler, after the water-heating heat recovery exchanger and after the air-heating heat recovery exchanger. The changes in the temperature of the exhaust gases regularities of the studied boiler plant various elements in the case of using the considered options for recirculated gas selection under conditions of changing their share in the air-gas mixture from 10 to 20 % and the relative heat load of the boiler from 30 to 100 % were established. Under these conditions, the levels of increase in efficiency in all elements of the boiler installation and the total efficiency with and without the proposed heat recovery system were determined. It is shown that the use of this system provides deep cooling of exhaust gases in the heat recovery process. The lower the temperature of the flue gas admixed in the options considered and the higher the share of gas recirculation, the lower the temperature of the exhaust gases for all elements of the boiler plant. The increase in the boiler plant efficiency due to the use of the proposed heat recovery system varies from 3 to 5 % in the case of a water-heating heat recovery exchanger and from 1 to 3 % in the case of an air-heating heat recovery exchanger, depending on the boiler load, the part of admixed gases and the options of their selection. The resulting increase in the boiler plant efficiency with a heat recovery and flue gas recirculation system is 1.4–4.7 %.*

**Key words:** *gas-consuming boilers, deep cooling of flue gases, water and blowing air heating, and increased efficiency*