

УДК 536.24:621.184.5

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНИХ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК

Фіалко Н.М., член-кореспондент НАН України, **Навродська Р.О.**, канд. техн. наук, **Шевчук С.І.**, канд. техн. наук, **Пресіч Г.О.**, канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.10>

Для опалювальних котельних установок наводяться нові схемні рішення систем утилізації теплоти відхідних газів, призначені для нагрівання теплоносіїв різних температурних потенціалів. Виконано аналіз основних характеристик даних систем та обґрунтовано вибір їх раціональної конфігурації.

For heating boiler plants, new schematic solutions for heat re-cover systems of exhaust gases designed to heating heat-transfer agents of various temperature potentials are given. The analysis of these systems main characteristics is carried out and the choice of their rational configuration is justified.

Бібл. 14, табл. 1, рис. 3

Ключові слова: газоспоживальні котельні установки, відхідні гази, системи теплоутилізації, різні теплоносії, ефективність.

G – витрата, кг/с;
 Q – теплопродуктивність, кВт;
 t – температура, °С;
 X – вологовміст газів, кг/кг с.г.;
 $\Delta\eta$ – приріст ККД, КВТП

Індекси:

в – вода;
 vx – вхід;
 г – гази;
 конд – конденсат;
 нс – навколишнє середовище;
 р – роса;
 сух – сухий;

Скорочення:

ВП – водопідігрівач;
 ВП ХВО – підігрівач води на хімоводоочищення;
 ГП – газопідігрівач;
 Д – димова труба;
 ДПН – додатковий повітронагрівач;
 К – котел;
 КВТП – коефіцієнта використання теплоти палива;
 ККД – коефіцієнт корисної дії;
 ПН – повітронагрівач;
 Nu – число Нусельта;
 Re – число Рейнольдса.

Вступ

Дефіцит власних ресурсів природного газу в Україні та значне зростання вартості придбаного газу, спонукає до пошуку ефективних заходів щодо розроблення та впровадження новітніх енергоощадних технологій для енергетичних установок. Ефективність цих технологій, зокрема для газоспоживальних котельних установок, визначається глибиною охолодження вихідних газів, а саме, рівнем зниження їхньої температури перед надходженням до димової труби. При зниженні цієї температури нижче точки роси водяної пари, що міститься в газах, відбувається конденсація частини пари і використання її теплоти конденсації. Рівень зниження температури залежить від характеристик застосовуваних теплоносіїв для використання утилізованої теплоти та раціонального компонування в теплоутилізаційних системах відповідного теплообмінного устаткування.

Дана робота присвячена розробленню і дослідженню для газоспоживальних котельних установок новітніх теплоутилізаційних систем підвищеної теплової ефективності з поглибленим охолодженням вихідних газів.

Створенню теплоутилізаційних технологій, спрямованих на підвищення ефективності використання палива в котельній практиці, приділяється значна увага [1–10]. Сучасні газоспоживальні котли мають в номінальному режимі ККД 92...94% при розрахунку за нижчою теплою згоряння палива. Даний ККД відповідає температурі відхідних димових газів 140 – 180 °С. Однак, завдяки тенденції енергозбереження в Україні і за її межами спостерігається намагання зниження цієї температури шляхом теплоутилізації димових газів. Найбільш розповсюджена схема теплоутилізації стосується попереднього підігрівання зворотної тепломережної води перед над-

ходженням її до котла. Це здійснюється або в окремому теплоутилізаторі – приставці до котла, або в спеціальній (конденсаційній) частині котла, агрегатованій в його корпус [1–5]. Така схема теплоутилізації не забезпечує охолодження димових газів нижче точки роси водяної пари протягом усього опалювального періоду через високу температуру зворотної води в деяких режимах роботи котла. Для підвищення ефективності використання палива в комунальних котлах розроблено комбіновані теплоутилізаційні системи. [6–10]. В цих системах після вказаного водогрійного теплоутилізатора встановлюються теплоутилізатори для нагрівання інших теплоносіїв, в яких існує потреба в котельнях і які мають нижчий рівень початкової температури, ніж зворотна вода. Такими теплоносіями слугують: дуттьове повітря та холодна вода, що надходить на хімоводоочищення. Як відомо, для забезпечення ефективного охолодження димових газів теплообмінники-утилізатори необхідно розташовувати за ходом димових газів у послідовності зменшення початкової температури нагріваного теплоносія. Однак, температури застосовуваних теплоносіїв протягом опалювального періоду змінюються в широких межах і вказаний підхід неможливо дотримати у всіх режимах експлуатації котла.

Мета роботи і постановка завдань досліджень

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності використання теплоти палива (КВТП) газоспоживальних опалювальних котельних установок шляхом застосування новітніх теплоутилізаційних технологій з нагріванням теплоносіїв різного призначення.

Для досягнення мети необхідно було вирішити такі завдання дослідження:

- розробити можливі варіанти комбінованих теплоутилізаційних систем котельних установок з використанням утилізованої теплоти для нагрівання зворотної тепломережної води, холодної води на ХВО та дуттьового повітря та з використанням теплових методів захисту газовідвідних трактив;
- виконати дослідження теплової ефективності розроблених варіантів за такими показниками як: теплопродуктивність, приріст ККД та коефіцієнта використання теплоти палива КВТП котла, а також обсяг утвореного конденсату в різних режимах експлуатації котла протягом опалювального періоду;
- виконати порівняльний аналіз запропонованих варіантів теплоутилізаційних систем опалювального котла та обґрунтувати вибір раціонального з них.

Методика проведення досліджень.

Для визначення основних характеристик теплоутилізаційних систем використовувались відомі

методи теплового розрахунку котельних установок [11] та дані експериментальних досліджень, отриманих авторами [12].

Так, розрахунок коефіцієнта тепловіддачі від димових газів при глибокому їх охолодженні здійснювався з використанням числа Nu_{Γ} у вигляді двох складових:

$$Nu_{\Gamma} = Nu_{\Gamma}^{сух} + Nu_{\Gamma}^{конд}, \quad (1)$$

де $Nu_{\Gamma}^{сух}$ – число Нусельта при так названому “сухому теплообміні”, розраховане за методичними рекомендаціями [12];

$Nu_{\Gamma}^{конд}$ – додаткова складова, пов’язана з конденсацією пари з димових газів при їх охолодженні нижче точки роси цієї пари.

$$Nu_{\Gamma}^{конд} = \tilde{A} \cdot Re_{\Gamma}^{0,6} \cdot e^{m \cdot \theta}, \quad (2)$$

де A – поправочний коефіцієнт, що залежить від вологовмісту $X_{вх}$:

$$\tilde{A} = 0,0001 \cdot e^{87 \cdot X_{вх}} + \frac{0,3}{X_{вх}}; m = -14;$$

$$m = -14; \theta - \text{безрозмірна температура: } \theta = \frac{t_{в}}{t_{р}}.$$

Розглядалися водогрійні котельні установки теплопродуктивністю 2 МВт. Вихідні дані для розрахункових досліджень наведено в табл.1.

В роботі запропоновано варіанти систем глибокої утилізації теплоти відхідних газів котла, призначені для нагрівання відповідно до потреб котельень таких теплоносіїв: зворотної тепломережної води котельні, холодної води, що надходить в систему хімоводоочищення, та дуттьового повітря (рис. 1). Для нагрівання цих теплоносіїв застосовуються відповідні теплоутилізатори (ВП, ВП ХВО та ПН). З метою запобігання корозійного руйнування димових труб теплоутилізаційні системи оснащені засобами для реалізації двох теплових методів відвернення конденсатуутворення в газовідвідних трактах – повітряного та підсушування охолоджених газів шляхом їхнього підігрівання [2,13]. Для реалізації повітряного методу встановлюється додатковий повітропідігрівач ДПН, у якому відхідними газами котла нагрівається частина повітря для підмішування у вихідний газохід, а для методу підсушування – газопідігрівачі ГП.

Таблиця 1 – Вихідні дані для теплового розрахунку водо- та повітрогрійного теплоутилізаторів

Найменування параметра	Значення
Навантаження котла, %	30 ÷ 100
Теплопродуктивність котла в номінальному режимі, МВт	2,0
Витрата природного газу, м³/год	70 ÷ 200
Витрата димових газів, кг/с	0,3 ÷ 0,9
Температура газів на виході з котла в номінальному режимі, °C	157
Коефіцієнт надлишку повітря	1,1
Вологовміст газів на виході з котла, кг /кг с.г.	0,135
Витрата води через котел, кг/с	19
Витрата холодної води на ХВО, кг/с	0,24 ÷ 0,38
Температура зворотної води, °C	30 ÷ 70
Температура води на ХВО, °C	5
Температура навколишнього середовища, °C	-20 ÷ +10
Розрахункова температура повітря для системи опалення, °C	-20
Розрахунковий перепад температур для системи опалення Δt_o , °C	25
ККД котла без теплоутилізаторів за нижчою теплотою згоряння палива, %	92 ÷ 94

Згідно з доцільністю розміщення теплоутилізаторів у напрямі зменшення початкової температури нагріваного теплоносія за ходом димових газів, за котлом першими встановлюються додатковий повітрянагрівач ДПН (за необхідності підігрівання повітря для підмішування до високої температури) та теплоутилізатор для нагрівання зворотної тепломережної води ВП.

Щодо теплоутилізаторів для нагрівання води на хімводоочищення (ХВО) та дуттьового повітря (ПН), то вирішення завдання їхнього розміщення в теплоутилізаційній системі не є однозначним. Так протягом опалювального періоду діапазон зміни початкової температура повітря на горіння становить $-20...+10$ °C, води на ХВО – $2...10$ °C. У відомій теплоутилізаційній системі [14], що розглядається в роботі варіантом 1 (рис.1а), використання теплоти димових газів реалізується при послідовному надходженні відхідних димових газів від котла в теплоутилізатор для нагрівання зворотної тепломережної води, далі в теплоутилізатор для попереднього підігрівання дуттьового повітря ПН, потім у теплоутилізатор для нагрівання холодної води на хімводоочищення ВП ХВО.

Другим варіантом корисного використання теплоти димових газів може слугувати теплоутилізаційна система (рис. 1б), в якій на відміну від першого варіанту теплоутилізатор для нагрівання води на хімводоочищення ВП ХВО встановлюється перед теплоутилізатором ПН.

В роботі виконано розрахункові дослідження ефективності зазначених варіантів систем. При виконанні досліджень розглядалися водогрійні теплоутилізатори, що компонувались із пучків оребрених біметалевих труб (сталева основа та алюмінієве оребрення). При цьому в пучках застосовувалися труби з внутрішнім діаметром 25 мм і товщиною 3,5 мм. Висота оребрення біметалевих труб дорівнювала 11 мм, а міжреберний крок – 3,5 мм. Повітрогрійними теплоутилізаторами слугували пластинчасті теплообмінники з нержавіючої сталі. Товщина пластин становила 2 мм, а крок 10 мм.

На рис. 2, 3 наведено результати залежності від температури навколишнього середовища t_{nc} протягом опалювального періоду теплопродуктивності Q , ККД, коефіцієнта використання теплоти палива котла КВТП котла $\Delta\eta$ та витрати конденсату $G_{конд}$ при різному компонуванні теплообмінників-теплоутилізаторів в теплоутилізаційній системі для двох розглянутих варіантів.

Як видно з наведених результатів, загальні досліджувані показники теплоутилізаційних систем (теплопродуктивність Q , коефіцієнт використання теплоти палива котла КВТП котла $\Delta\eta$ та витрата конденсату $G_{конд}$) є дуже близькими для обох варіантів. Так Q змінюється в межах 120...190 КВт, КВТП котла $\Delta\eta$ – 6,8...8,3% та $G_{конд}$ – 0,027...0,040 кг/с. Перерозподіл цих показників у розглянутих системах здійснюється в окремих теплоутилізаторах.

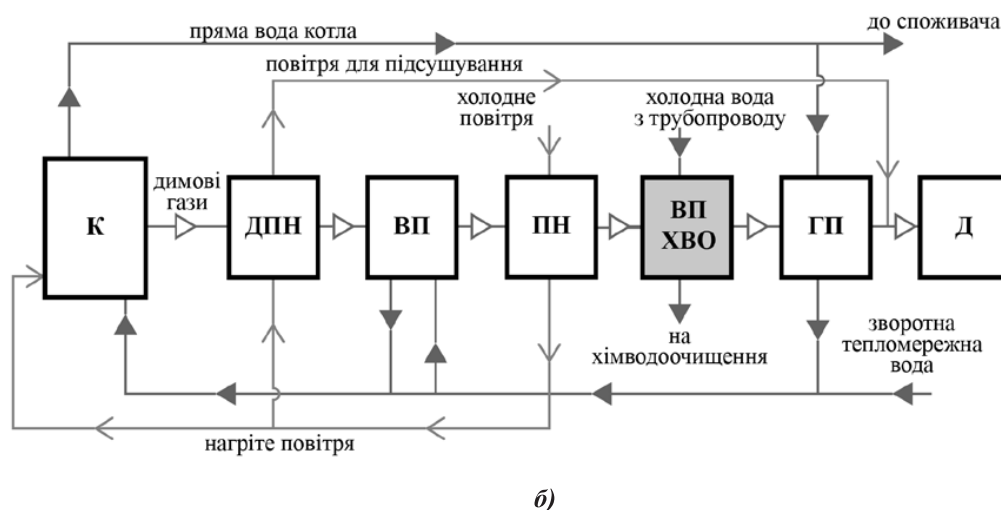
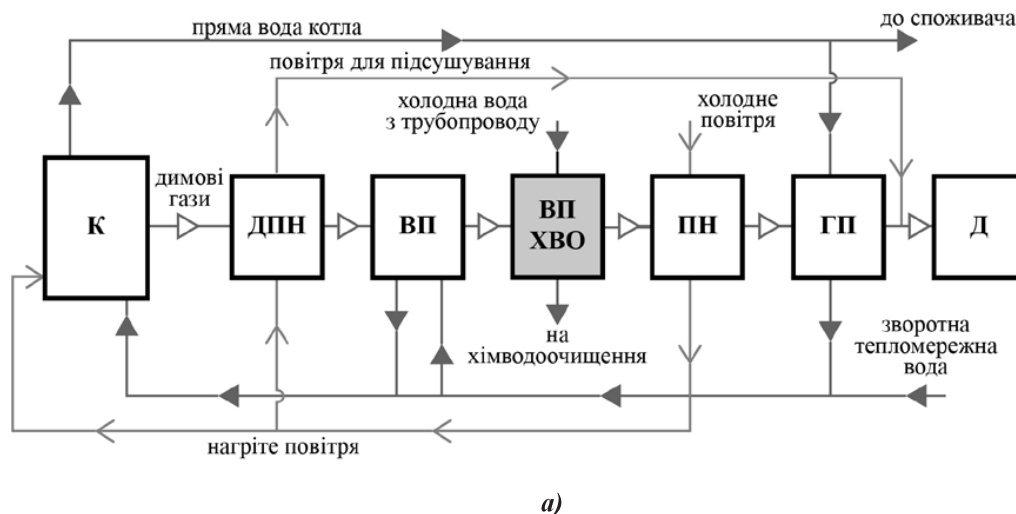


Рис. 1. Варіанти теплоутилізаційних систем опалювальних котлів при нагріванні різних теплоносіїв
К – котел; **ДПН** – додатковий повітрянагрівач; **ВП** – водопідігрівач; **ВП ХВО** – підігрівач води на хімоводоочищення; **ПН** – повітрянагрівач; **ГП** – газопідігрівач; **Д** – димова труба

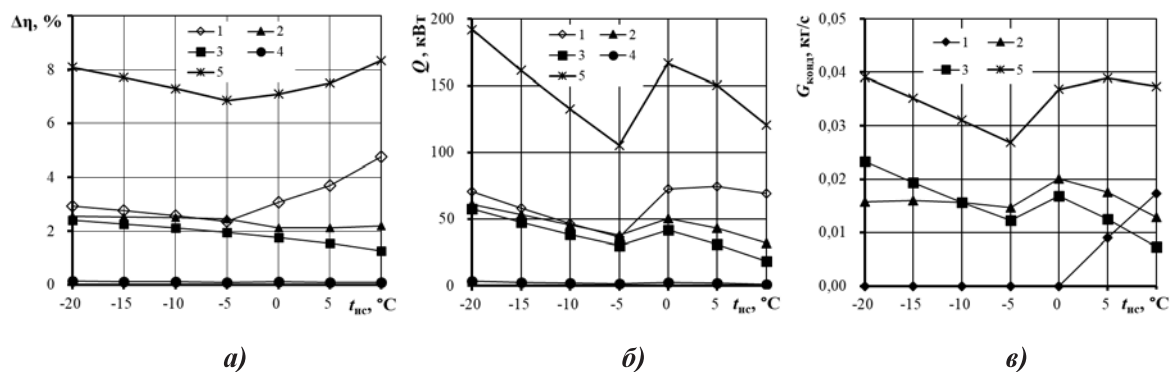


Рис. 2. Рівні приросту ККД та КВТП котла (а), теплотворності (б) та обсягів утворюваного конденсату (в) для всієї теплоутилізаційної системи та окремих теплоутилізаторів за умови розміщення ВП ХВО перед повітрянагрівачем ПН
1 – водопідігрівач ВП; **2** – підігрівач води на хімоводоочищення ВП ХВО; **3** – повітрянагрівач ПН; **4** – додатковий повітрянагрівач ДПН; **5** – уся теплоутилізаційна система.

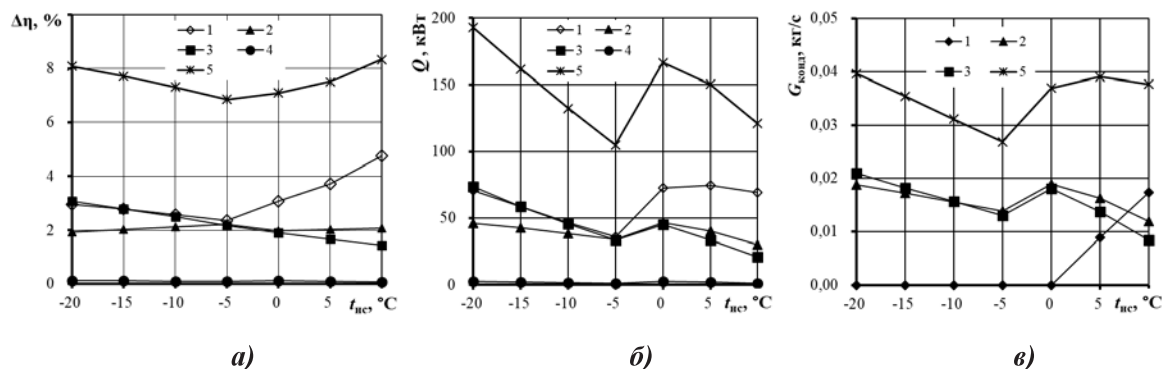


Рис. 3. Рівні приросту ККД та КВТП котла (а), теплопродуктивності (б) та обсягів утворення конденсату (в) для всієї теплоутилізаційної системи та окремих теплоутилізаторів за умови розміщення ВП ХВО після повітрянагрівача ПН
 1 – водопідігрівач ВП; 2 – підігрівач води на хімоводоочищення ВП ХВО; – повітрянагрівач ПН; 4 – додатковий повітрянагрівач ДПН; 5 – уся теплоутилізаційна система

Отримані результати дозволяють при створенні теплоутилізаційних систем враховувати інші особливості компоновання теплообмінників-теплоутилізаторів в цих системах. А саме: використання другого з розглянутих варіантів систем, при розміщенні теплоутилізатора для нагрівання дуттьового повітря ПН після теплоутилізатора для нагрівання води на хімоводоочищення (ВП ХВО), дає змогу конструкційного агрегування теплоутилізаторів ВП та ВП ХВО в одному корпусі. Це забезпечує зменшення втрат теплоти з поверхні з'єднувальних трубопроводів та газоходів, вищу компактність теплоутилізаційної установки, що є дуже важливим в умовах зазвичай дефіциту вільних площ в котельнях. На основі виконаних досліджень можна зробити вибір на користь пріоритетного застосування даного варіанту теплоутилізаційної системи.

Висновки.

1. Виконано дослідження ефективності двох запропонованих комбінованих систем утилізації теплоти відхідних газів опалювальних котлів за такими показниками, як: теплопродуктивність, рівень приросту коефіцієнта використання теплоти палива котла КВТП, обсяг утвореного конденсату.

2. Показано, що застосування запропонованих систем дозволяє реалізовувати режими їхньої роботи зі зниженням температури газів нижче точки роси протягом усього опалювального періоду та завдяки цьому підвищити КВТП котла на 6,8...8,3 %.

3. Встановлено, що для обох розглянутих варіантів теплоутилізаційних систем та в усіх режимах роботи котельної установки загальні показники теплопродуктивності, рівня приросту коефіцієнта ви-

користання теплоти палива котла КВТП та обсягів утвореного конденсату є близькими за величиною. Відмінності у запропонованих варіантах стосуються лише перерозподілу значень вказаних показників у різних теплообмінниках-теплоутилізаторах системи.

4. За даними досліджень пропонується компоновання теплоутилізаційної системи з розміщенням теплообмінника ВП ХВО перед повітрянагрівачем ПН, оскільки дане рішення дозволяє агрегувати два водогрійних теплоутилізаторів (ВП та ВП ХВО) в одному корпусі. Вказане агрегування забезпечує підвищення компактності теплоутилізаційної установки та зменшення втрат теплоти з поверхні з'єднувальних газоходів та трубопроводів.

ЛІТЕРАТУРА:

- Ефимов А.В., Гончаренко А.Л., Гончаренко Л.В., Есипенко Т.А. Современные технологии глубокого охлаждения продуктов сгорания топлива в котельных установках, их проблемы и пути решения: монография. Харьков: НТУ «ХПИ». 2017. 233с. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/32826>.
- Долинский А.А., Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Гнедаш Г.А. Основные принципы создания теплоутилизационных технологий для котельных малой теплоэнергетики. Промышленная теплотехника. 2014. № 4. С. 27–36.
- Фиалко Н. М., Аронов И. З., Навродская Р. А., Пресич Г. А. Эффективность применения конденсационных теплоутилизаторов в системах теплоснабжения. Промышленная теплотехника. 2003. Т. 25. № 3. С. 36–41.

4. Кудинов А.А., Зиганишина С.К. Охлаждение продуктов сгорания природного газа в конденсационных теплоутилизаторах. Промышленная энергетика. 2010. №4. С. 39–43.
5. Капишиников А.П. Принципы развития конструкции конденсационных экономайзеров. Промышленная энергетика. 1999. №3. С. 29–33.
6. Fialko N. M., Navrodska R. O., Shevchuk S. I., Gnedash G. O. The environmental reliability of gas-fired boiler units by applying modern heat-recovery technologies. Natsional'nyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk. 2020. No2. P. 96–100. <https://doi.org/10.33271/nvngu/20202/096>
7. Фіалко Н. М., Гнедаш Г. О., Навродська Р. О., Пресіч Г. О., Шевчук С. І. Підвищення ефективності комбінованих теплоутилізаційних систем газоспоживальних котельних установок. Науковий вісник НЛТУ України. 2019. Т.29, № 6, С. 79–82. <https://doi.org/10.15421/40290616>
8. 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>
9. Fialko N. M., Stepanova A. I., Navrodska R. O., Gnedash G. O., Shevchuk S. I. Complex Methods for Analysis of Efficiency and Optimization of Heat-Recovery Systems. Sci. innov. 2021. V. 17, no. 4. P. 11–18. <https://doi.org/10.15407/scine17.04.011>
10. Комбіновані теплоутилізаційні системи для газоспоживальних котлів комунальної теплоенергетики: монографія / Н.М. Фіалко та ін.: Київ: «Про формат». 2019. 192 с.
11. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / под ред. Н.В. Кузнецова. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 296 с.
12. 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>
13. Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок: монография / Н.М. Фіалко и др.: Киев: «Про формат». 2018. 248 с.
14. Котельна установка: пат. 124125 Україна: МПК F22B 33/00, F22D 1/36, F24H 8/00, F23L 15/00. № 201910480; заявл. 21.10.19; опубл. 21.07.21, Бюл. № 29.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF COMPLEX HEAT RECOVERY SYSTEMS OF BOILER PLANTS

Fialko N.M., Navrodska R.O., Shevchuk S.I., Presich G.O.

Institute of engineering thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Maria Kapnist St., Kiev, 03680, Ukraine.

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.10>

The results of studies for heating boiler plants of the main thermal characteristics of complex heat recovery systems with deep cooling of flue gases of higher thermal efficiency are presented. Systems for heating various heat-transfer agents, which, in accordance with the needs of heating boiler houses, can be return heat-network water, cold water entering the chemical water-purification system (CWP), and combustion air are considered. Two effective variants of such complex systems have been developed. These options differ in the sequence of installation of heat recovery exchangers for heating combustion air and cold water for the chemical water-purification. In the first variant, the heat-recovery exchanger for heating air is placed after the heat-recovery exchanger for heating the heat-network water in front of the heat exchanger for heating water for the CWP, and in the second, on the contrary, after the latter. In order to protect the gas exhaust ducts from condensate formation, these systems provide for the joint application of two thermal methods: air and drying in the gas-heater. The thermal efficiency of the developed system options was investigated according to such indicators as efficiency and coefficient the use heat of fuel of boiler CUHF, heating capacity and condensate formed volume of the system in different modes of boiler operation during the heating period. Studies have shown that these systems provide a 6.8-8.3% increase in coefficient the use heat of fuel of boiler CUHF. At the same time, the total indicators of the considered heat recovery systems are approxi-mately the same for the two options. The redistribution of the values of these indicators is carried out in separate heat-recovery exchangers. On the basis of the conducted studies, the choice of the most rational option of the complex heat recovery system with the placement of heat recovery exchangers according to the second of the considered options is substantiated. This technical solution allows the aggregation of two water-heating exchangers in one housing. This aggregation provides increased compactness of the heat-recovery equipment and reduction of heat losses from the surface of the connecting gas ducts and pipelines.

References 14, tables 1, figures 3.

Key words: gas-fired boiler plants, exhaust gases, heat recovery systems, various heat-transfer agent, efficiency.

1. Efimov A.V., Goncharenko A.L., Goncharenko L.V., Esipenko T.A. Modern technologies of deep cooling of fuel combustion products in boiler plants, their problems and solutions: monograph. Kharkiv: NTU "KhPI". 2017. 233 p. Retrieved from <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/32826>. (in Rus.)

2. Dolinskiy A.A., Fialko N.M., Navrodska R.A., Gnedash G.A. Basic principles of heat recovery technologies for boilers of the low thermal power. Industrial heat Engineering. 2014. no 4. P. 27-36. (in Rus.)

3. Fialko N.M., Aronov I. Z., Navrodska R.A., Presich G. A. Effektivnost primeneniia kondensatsionnykh teploutilizatorov v sistemakh teplosnabzheniia [Efficiency of using condensing heat exchangers in heat supply systems]. Industrial heat Engineering. 2003. V. 25. no 3. P. 36-41. (in Rus.)

4. Kudinov A.A., Ziganshina S.K. Okhlagdeniie produktov sgoraniia priridnogo gaza v kondensatsionnykh teploutilizatorakh [Cooling of natural gas combustion products in condensing heat exchangers]. Industrial energy. 2010. no4. P. 39-43. (in Rus.)

5. Kapishnikov A.P. Printsipy razvitiia konstrukttsii kondensatsionnykh ekonomayzerov [Development principles of the condensing economizers design]. Industrial energy. 1999. no 3. P. 29-33. (in Rus.)

6. Fialko N. M., Navrodska R. O., Shevchuk S. I., Gnedash G. O. The environmental reliability of gas-fired boiler units by applying modern heat-recovery technologies. Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk. 2020. no2. P. 96-100. <https://doi.org/10.33271/nvngu/20202/096>

7. Fialko N. M., Gnedash G. O., Navrodska R. O., Presich G. O., Shevchuk S. I. Improving the efficiency of complex heat-recovery systems for gas-fired boiler installations. Scientific Bulletin of UNFU. 2019. Vol.29, no 6, P. 79-82. <https://doi.org/10.15421/40290616>

8. 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>

9. Fialko N. M., Stepanova A. I., Navrodska R. O., Gnedash G. O., Shevchuk S. I. Complex Methods for Analysis of Efficiency and Optimization of Heat-Recovery Systems. Sci. innov. 2021. V. 17, no. 4. P. 11-18. <https://doi.org/10.15407/scine17.04.011>

10. Fialko N., Navrodska R., Presich G., Gnedash G., Shevchuk S., Stepanova A. Kombinovani teploutyly-zatsiini systemy dlia gazospozhyvalnykh kotliv komunalnoi

teploenergetyky [Combined heat utilization systems for gas-fired boilers of communal heat energy]. Kiev: Printing house "About format". 2019.192p.

11. *Teplovoy rasschet kotelnykh agregatov* [Thermal calculation of boiler units]. Normative method / ed. N.V. Kuznetsova M.: ECOLIT, 2011. 296 p. (in Rus).

12. *Navrodska R. A., Stepanova A. I., Shevchuk S. I., Gnedash G. A., Presich G. A.* 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>

13. *Teplovyye metody zashchity gazootvodiashchikh traktov kotelnykh ustanovok* [Thermal methods for the protection of the exhaust ducts of boiler plants]. N.M. Fialko et. al. Kyiv: «Pro format». 2018. 248 p. (in Rus).

14. *Котельна установка*: пат. 124125 Україна: МПК F22B 33/00, F22D 1/36, F24H 8/00, F23L 15/00. № 201910480; заявл. 21.10.19; опубл. 21.07.21, Бюл. № 29.

Отримано 16.05.2022

Received 16.05.2022