

УДК 621.181.6

ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЛЕКСНИХ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК

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

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

Показано, що зволоження дуттьового повітря в комплексних теплоутилізаційних системах газоспоживальних котельних установок забезпечує суттєве зменшення концентрації оксидів азоту в димових газах за рахунок пригнічення їх утворення в топці котла при введенні вологи з цим повітрям.

Показано, что увлажнение дутьевого воздуха в комплексных теплоутилизационных системах газопотребляющих котельных установок обеспечивает существенное уменьшение концентрации оксидов азота в дымовых газах за счет подавления их образования в топке котла при введении влаги с этим воздухом.

It is revealed that the humidifying of blown air in complex heat recovery systems of gas-fired boiler plants provides the significant reduction in the concentration of nitrogen oxides in exhaust-gases due to the suppression of their formation in the boiler furnace when moisture is introduced with this air.

Бібл. 15, рис. 3.

Ключові слова: газоспоживальні котлоагрегати, комплексні теплоутилізаційні системи, зволоження дуттьового повітря, зменшення викидів оксидів азоту.

G – витрата;
 NO_x – оксиди азота;
 t – температура;
 β – водопаливне співвідношення;

Скорочення:
 КВТП – коефіцієнт використання теплоти палива;
 ХВО – хімоводоочищення;

Індекси:
 в – волога;
 вих – вихід;
 вх – вхід;
 нс – навколишнє середовище;
 пг – природний газ.

Проблеми ощадного використання палива та захисту довкілля стали пріоритетними в світовій енергетичній практиці. Основним напрямом підвищення ефективності використання палива є утилізація скидної теплоти різних теплоенергетичних систем [1-12]. Покращення екологічних показників енергетичних об'єктів здійснюється при застосуванні теплоутилізаційних технологій та спеціальних заходів. Актуальність наукових завдань за вказаними напрямками зростає у зв'язку з неуклінімим дорожчанням палива та посиленням вимог щодо зменшення забруднення навколишнього середовища.

Один із шляхів покращення екологічних показників котельних установок комунальної теплоенергетики полягає у зниженні викидів оксидів азоту в навколишнє середовище завдяки пригнічуванню їх утворення в топковому просторі котла при зниженні температури горіння [13-15].

Для підвищення ефективності використання палива в котельних установках застосовуються комплексні теплоутилізаційні системи [1, 8, 11, 12], в яких утилізована теплота використовується для різних потреб, наприклад, для підігрівання води систем хімоводоочищення (ХВО) та нагрівання зі зволоженням дуттьового повітря. Принципова схема такої комплексної теплоутилізаційної системи наведена на рис. 1.

Підігрівання повітря та води ХВО в таких системах

призначене підвищити КВТП котла, а його зволоження у контактній камері – зменшити рівень утворення оксидів азоту завдяки зниженню температури в топковому просторі.

Робота теплоутилізаційної установки здійснюється таким чином.

Відхідні димові гази котлоагрегата з підвищеним вологовмістом спочатку охолоджуються у водогрівачі (ВД), а далі надходять у водопідігрівач (ПВ), де охолодження відбувається нижче точки роси водяної пари, що міститься в цих газах, тобто в конденсаційному режимі з використанням теплоти конденсації частини пари з димових газів. Подальше охолодження димових газів з реалізацією конденсаційного режиму здійснюється у підігрівачі холодної води системи хімоводоочищення (ВП ХВО). Димові гази після водопідігрівачів ВД та ВП ХВО підсушуються у газопідігрівачі (ГП) до рівня, що дозволяє уникнути конденсатоутворення у газовідвідних каналах котельної установки, і надходять до димової труби.

Вода з водозбірника ВЗ забирається насосом і спочатку прокачується через водопідігрівач ПВ, де нагрівається, а далі циркуляційний контур розгалужується. Частина води надходить до контактної повітропідігрівача (КП), у якому стікає по тепломасообмінній насадці, охолоджується з частковим випаровуванням і надходить до водозбірника ВЗ. Решта води проходить через

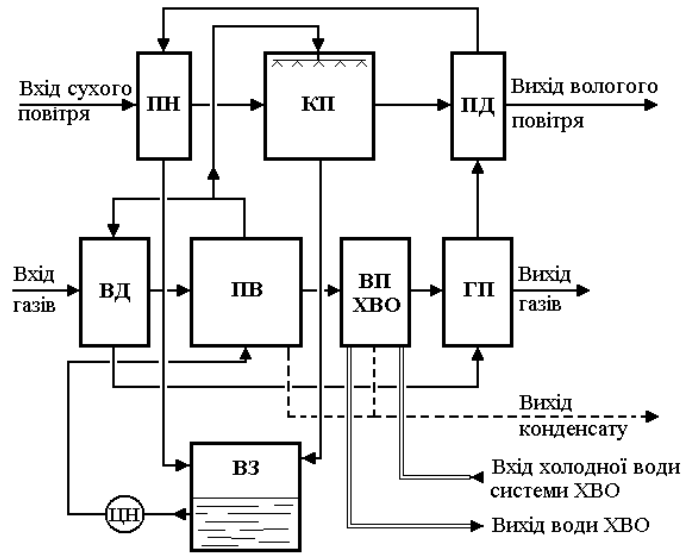


Рис. 1. Принципова схема комплексної теплоутилізаційної системи для підігрівання і зволоження дуттьового повітря та підігрівання холодної води на хімводоочищення:

ПН – повітрянагрівач; КП – контактний повітронідігрівач; ПД – повітродогрівач;

ВД – вододогрівач; ПВ – поверхневий водонідігрівач; ВП ХВО – водонідігрівач холодної води системи ХВО; ГП – газонідігрівач; ВЗ – водозбірник; ЦН – циркуляційний насос.

вододогрівач ВД, газонідігрівач ГП, повітродогрівач ПД і повітрянагрівач ПН, послідовно охолоджуючись, і також надходить до ВЗ. Далі цикл повторюється.

Холодне відносно сухе повітря ззовні котельні спочатку надходить до повітрянагрівача ПН, де підігрівається, далі спрямовується до контактного теплообмінника КП, у якому нагрівається та зволожується, і через повітродогрівач ПД відводиться з теплоутилізаційної установки, після чого подається у повітровід і надходить до газопальникового пристрою котельного агрегата.

Завдяки підвищенню температури повітря, тобто збільшенню його вологоємності перед контактним повітронідігрівачем, збільшується споживання останнім теплоти і підвищується екологічна ефективність котла за рахунок зменшення утворення NO_x в топковій камері котла.

Мета даної роботи полягає в оцінюванні обсягів зменшення викидів оксидів азоту при зволоженні дуттьового повітря для водогрійних та парових газоспоживальних котлів в різних режимах роботи зазначеної комплексної теплоутилізаційної системи.

При проведенні досліджень, навантаження водогрійного котла приймалося згідно з тепломережним графіком котельні з перепадом температур теплоносія $95 \dots 70^\circ\text{C}$, а парового – відповідало двом режимам його роботи за регламентом, а саме 100 і 50 %. Температура навколишнього середовища t_{nc} змінювалась від мінус 20 до плюс 10°C . Обсяги зменшення NO_x визначались в залежності від водопаливного співвідношення β в топці котла за даними [15].

Відносне зменшення оксидів азоту в продуктах зго-

рання завдяки зволоженню дуттьового повітря розраховувалось за формулами:

$$\text{NO}_x^{\text{вих}} / \text{NO}_x^{\text{вх}} = 0,947e^{0,995\beta} + 0,066, \quad (1)$$

$$\beta = G_v / G_{\text{пр}}, \text{ кг/кг}, \quad (2)$$

де β – водопаливне співвідношення;
 $G_{\text{пр}}$, G_v – масові витрати природного газу та вологи, що вноситься в топку з дуттьовим повітрям.

Результати розрахунків наведено на рис. 2. Як видно з наведених даних, для водогрійного котла при застосуванні запропонованої системи теплоутилізації реалізується відносне зменшення $\text{NO}_x^{\text{вих}}/\text{NO}_x^{\text{вх}}$ обсягів утворення оксидів азоту від 22 до 63 % в залежності від режиму роботи котла згідно з температурою навколишнього середовища t_{nc} . Область мінімальних значень $\text{NO}_x^{\text{вих}}/\text{NO}_x^{\text{вх}}$ відповідає тепловому періоду опалювального сезону. Це пов'язано з більш високою вхідною температурою повітря ($t_{\text{вх}}$) та зменшенням його витрати згідно з температурним графіком котельні.

При підвищенні вказаної температури зростає і температура повітря на вході в контактну камеру, що дозволяє зволожити це повітря до більш високого рівня, а відповідно і збільшити водопаливне співвідношення, що забезпечує зменшення обсягів утворення оксидів азоту в топковому просторі котла.

Для парового котла результати досліджень свідчать, що діапазон зміни $\text{NO}_x^{\text{вих}}/\text{NO}_x^{\text{вх}}$ також залежить від режиму його роботи та вхідної температури нагріваного повітря ($t_{\text{вх}}$). Більш відчутний рівень зниження співвідношення $\text{NO}_x^{\text{вих}}/\text{NO}_x^{\text{вх}}$ відповідає 50 % навантаженню

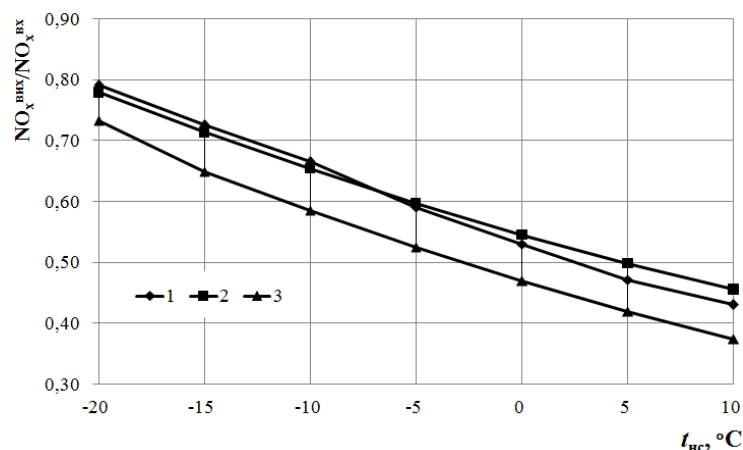


Рис. 2. Залежність від температури навколишнього середовища відносного зменшення оксидів азоту в топковому просторі водогрійного та парового котлів в різних режимах їхньої роботи при застосуванні комплексної теплоутилізаційної системи для підігрівання і зволоження дуттьового повітря та нагрівання води на хімоводоочищення:
1 – водогрійний котел; 2, 3 – паровий котел з навантаженням 100 та 50 % відповідно.

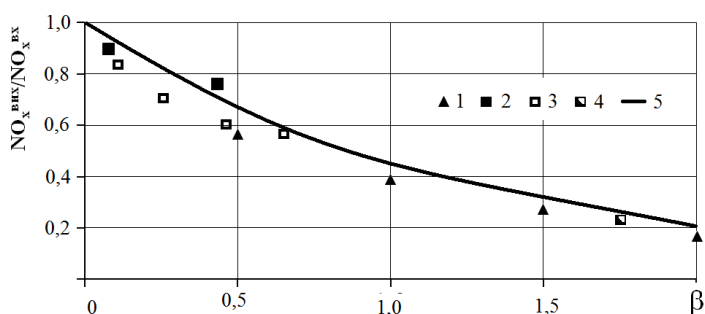


Рис. 3. Зіставлення розрахункових та експериментальних даних відносної концентрації NO_x у відхідних газах при зволоженні повітря у контактній камері комплексної теплоутилізаційної системи в залежності від водопаливного співвідношення β :
1, 2, 3 – експериментальні дані інших дослідників [15]; 4 – експериментальні дані власних випробувань;
5 – теоретична крива за співвідношенням (1).

котла, що пов'язано зі зменшенням витрат повітря та палива. Так при даному навантаженні обсяги зменшення утворення оксидів азоту змінюються від 27 до 63 %, а при навантаженні 100 % – лише в межах 21...54 %. При цьому більші значення вказаного зменшення відповідають вищим температурам $t_{амб}$, що, як зазначалося, зумовлено більшим рівнем зволоження, а відтак і рівнем водопаливного співвідношення.

Достовірність результатів досліджень доводиться шляхом зіставлення даних розрахунків та експериментів при оцінюванні рівня зниження викидів оксидів азоту шляхом введення вологи з дуттьовим повітрям в топку котла. Відповідні результати наведено на рис. 3.

Розрахункові дані зниження NO_x (крива 5) визначались за залежністю (1). Експериментальні точки відповідали результатам інших дослідників [15] та власних вимірів NO_x на виході з комплексної системи

для підігрівання та зволоження дуттьового повітря, яка впроваджена у котельні ПАТ «Київенерго».

Результати вказують на цілком задовільний збіг розрахункових та експериментальних даних.

Застосування для котельних установок комплексних теплоутилізаційних систем з підігріванням і зволоженням дуттьового повітря та нагріванням води на хімоводоочищення окрім підвищення екологічної ефективності котлів забезпечує збільшення їхнього коефіцієнта використання теплоти палива на 11...18 %.

Висновок

Теплоутилізаційні технології зі зволоженням дуттьового повітря для парових і водогрійних котельних установок забезпечують підвищення ефективності використання теплоти палива та скорочення викидів оксидів азоту на 21...63 % в залежності від навантаження котла.

ЛІТЕРАТУРА

1. Долинский, А. А., Фиалко, Н. М., Навродская, Р. А., Гнедаш, Г. А. (2014). Основные принципы создания теплоутилизационных технологий для котельных малой энергетики. Промышленная теплотехника, 36(4), 27-34.
2. Фиалко, Н. М., Навродская, Р. А., Шевчук, С. И., Пресич, Г. А., Гнедаш, Г. А., Глушак, О. Ю. (2014). Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок с глубоким охлаждением дымовых газов. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии, 2(15), 13-17.
3. Зимин, Л. Б., Фиалко, Н. М. (2008). Анализ эффективности теплонасосных систем утилизации теплоты канализационных стоков для теплоснабжения социальных объектов. Промышленная теплотехника, 30(1), 77-85.
4. Фиалко, Н. М., Аронов, И. З., Навродская, Р. А., Пресич, Г. А. (2003). Эффективность применения конденсационных теплоутилизаторов в системах теплоснабжения. Промышленная теплотехника, 25(3), 36-41.
5. Фиалко, Н.М., Зимин, Л.Б., Дубовской, С.В. (2000). Утилизация энергии выбросов систем местной вентиляции метрополитенов с помощью тепловых насосов. Промышленная теплотехника, 22(1), 90-93.
6. Фиалко, Н. М., Гомон, В. И., Навродская, Р. А., Прокопов, В. Г., Пресич, Г. А. (2000). Особенности методики расчета поверхностных теплоутилизаторов конденсационного типа. Промышленная теплотехника. 22(2), 49-53.
7. Фиалко, Н. М., Шеренковский, Ю. В., Степанова, А. И., Пресич, Г. А., Навродская, Р. А., Малецкая, О. Е., Гнедаш, Г. А. (2012). Термодинамическая оптимизация и анализ эффективности теплоутилизационной системы котельных агрегатов. Промышленная теплотехника. 34(2), 59-66.
8. Фиалко, Н. М., Пресич, Г. О., Навродська, Р. О., Гнедаш, Г. О. (2011). Удосконалення комплексної системи утилізації теплоти відхідних газів котлоагрегатів для підігрівання і зволоження дуттьового повітря. Промышленная теплотехника. 33(5), 88-95.
9. Фиалко, Н. М., Навродская, Р. А., Пресич, Г. А. (2007). Анализ эффективности теплообменного оборудования для обеспечения отсутствия конденсатообразования в газоотводящих трактах котельных. Проблемы промышленной теплотехники: тезисы V-ой Международной конференции. Издательство Лыбидь, 171-172.
10. Фиалко, Н. М., Шеренковский, Ю. В., Степанова, А. И., Голубинский, П. К., Навродская, Р. А., Новиковский, М. А. (2008). Комплексный подход к оценке эффективности систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок. Экологические и ресурсосбережение, (5), 22-28.
11. Фиалко, Н. М., Навродская, Р. А., Гнедаш, Г. А., Пресич, Г. А., Степанова, А. И., Шевчук, С. И. (2014). Повышение эффективности котельных установок коммунальной теплоэнергетики путем комбинированного использования теплоты отходящих газов. Альтернативная энергетика и экология, (15), 126-129.
12. Навродська, Р. О., Фиалко, Н. М., Гнедаш, Г. О., Сбродова, Г. О. (2017). Енергоефективна теплоутилізаційна система для підігрівання тепломережної води та дуттьового повітря котлів комунальної теплоенергетики. Промислова теплотехніка, 39(4), 69-75.
13. Сигал, А. И. (2004). Влияние влаги в дутьевом воздухе на эффективность работы котлов промышленной и коммунальной энергетики. Теплоэнергетика, 12, 34-37.
14. Бухаркин, Е. Н. (2004). К вопросу об улучшении экологических показателей газоиспользующих установок. Промышленная энергетика, 6, 40-42.
15. Дашевский, Ю. М., Новиков, Б. Е., Хасанов-Агаев, Л. Р. (1991). Некоторые экологические аспекты внедрения природоохранных и энергосберегающих технологий на ТЭС. Теплоэнергетика, 4, 61-63.

INCREASE OF ECOLOGICAL EFFECTIVENESS OF COMPLEX HEAT-RECOVERY SYSTEMS FOR BOILER PLANTS

**Fialko N. M., Navrodska R. A., Presich G. A.,
Gnedash G. A., Shevchuk S. I., Martiuk O.V.**

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
vul. Zheliabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

Problems of environmental protection and energy-saving became priority in world practice. The main directions of deciding these pressing problems in municipal heat-power engineering is to improve the environmental indicators of heating boiler plants and increase the efficiency of using fuel in them through the use of technologies for deep recovery of the exhaust-gases heat. The relevance of scientific problems in these directions is increasing due to the steady increase in the fuel-energy costs and the strengthening of requirements to reducing environmental pollution.

When using these technologies of deep heat-recovery of exhaust-gases, the condensation mode of the heat-recovery equipment is realized, when, apart from to the so-called clear heat of these gases, the latent heat of condensation of the water vapor contained in them is also used. The condensation mode implementation also improves the ecological indicators of the boiler due to the reduction of fuel consumption and the dissolution in the resulting condensate of a part of harmful emissions formed during its combustion.

The use of modern heat-recovery technologies for the gas-fired boiler plants with complex use of recovered heat for the preheating of boiler water, water of the chemical water-purification system and blowing air makes it possible to reduce fuel consumption in the boiler and, accordingly, its harmful emissions by 8...12 %.

Humidification of the blowing air through the use of the recovery heat also provides a reduction of nitrogen oxides emissions to 60 % by suppressing their formation in the boiler combustion chamber.

References 15, figures 3.

Key words: gas-fired boilers, complex heat-recovery systems, blown air humidifying, decrease of nitrogen oxides.

1. Dolinskiy, A. A., Fialko, N. M., Navrodska, R. A., Gnedash, G. A. (2014). Osnovnyye printsipy sozdaniya teploutilizatsionnykh tekhnologiy dlia kotelnykh maloy energetiki [Basic principles of heat recovery technologies for boilers of the low thermal power]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 36(4), 27-35. (Rus.)

2. Fialko, N. M., Navrodska, R. A., Shevchuk, S. I., Presich, G. A., Gnedash, G. A., Glushak, O. Yu. (2014). Teplovyye metody zashchity gazootvodyashchikh traktov kotelnykh ustanovok s glubokim okhlazhdeniyem dymovykh gazov [Thermal protection methods of gas exhaust ducts of boiler plants with deep exhaust gases cooling]. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezultaty, tekhnologii* [Modern Science: Researches, Ideas,

Results, Technologies], 2(15), 13-17. (Rus.)

3. Zimin, L. B., Fialko, N. M. (2008). Analiz effektivnosti teplonasosnykh sistem utilizatsii teplovykh kanalizatsionnykh stokov dlia teplosnabzheniya sotsialnykh obektov [Analysis of the effectiveness of heat pump systems of sewage runoff heat recovery for social facilities heat supply]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 30(1), 77-85. (Rus.)

4. Fialko, N. M., Aronov, I. Z., Navrodska, R. A., Presich, G. A. (2003). Effektivnost primeneniya kondensatsionnykh teploutilizatorov v sistemakh teplosnabzheniya [The efficacy of the condensing heat exchanger in heat supply systems]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 25(3), 36-41. (Rus.)

5. Fialko, N. M., Zimin, L. B., Dubovskoy, S. V. (2000). Utilizatsiya energii vybrosov sistem mestnoy ventilyatsii metropolitenov s pomoshchyu teplovykh nasosov [Utilization of energy emissions of local ventilation systems of subways using heat pumps]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 22(1), 90-93. (Rus.)

6. Fialko, N. M., Gomon, V. I., Navrodska, R. A., Prokopov, V. G., Presich, G. A. (2000). Osobennosti metodiki rascheta poverkhnostnykh teploutilizatorov kondensatsionnogo tipa [Specifics of the calculation procedure for surface heat exchangers of condensation type, *Industrial heat engineering*]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 22(2), 49-53. (Rus.)

7. Fialko, N. M., Sherenkovskiy, Yu. V., Stepanova, A. I., Presich, G. A., Navrodska, R. A., Maletskaya, O. Ye., Gnedash, G. A. (2012). Termodinamicheskaya optimizatsiya i analiz effektivnosti teploutilizatsionnoy sistemy kotelnykh agregatov [Thermodynamical optimization and analysis of efficiency for heatutilizing systems of boiler plants]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 34(2), 59-66. (Rus.)

8. Fialko, N. M., Presich, G. A., Navrodska, R. A., Gnedash, G. A. (2011). Udoskonalennia kompleksnoi systemy utylizatsii teplovykh vidkhidnykh haziv kotloahrehativ dlia pidihrivannia i zvolozhennia duttovoho povitria [Improvement of the complex heat-recovery system of exhaust-gases of boilers for heating and humidifying blown air]. *Promyshlennaia teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 33(5), 88-95. (Ukr.)

9. Fialko, N. M., Navrodska, R. A., Presich, G. A. (2007). Analiz effektivnosti teploobmennogo oborudovaniya dlia obespecheniya otsutstviya kondensatoobrazovaniya v gazootvodiashchikh traktakh kotelnykh [Analysis of the efficiency of heat exchange equipment to ensure the absence of condensate formation in the gas ducts of boiler plants]. *Problemy promyshlennoy teplotekhniki: tezisy V-oy Mezhdunarodnoy konferentsii. Izdatelstvo Lybid* [Problems of industrial heat engineering: the theses of the Vth International Conference. Publishing house Lybid], 171-172. (Rus.)

10. Fialko, N. M., Sherenkovskiy, Yu. V., Stepanova, A. I., Golubinskiy, P. K., Navrodska, R. A., Novakovskiy, M. A. (2008). Kompleksnyy podkhod k otsenke effektivnosti sistem utilizatsii teplovykh otkhodiashchikh gazov energeti-

cheskikh ustanovok [Efficiency estimation systems for waste gases in power installations heat utilization]. *Ekotekhnologii i resursoberezeniye* [Energy technologies and resource saving], (5), 22-28. (Rus.)

11. *Fialko, N. M., Navrodsкая, R. A., Gnedash, G. A., Presich, G. A., Stepanova, A. I., Shevchuk, S. I.* (2014). Povysheniye effektivnosti kotelnykh ustanovok kommunalnoy teploenergetiki putem kombinirovannogo ispolzovaniya teploty otkhodyashchikh gazov [Efficiency increase of municipal power boiler-installations system by the combined use of exhaust gases for heating]. *Alternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)], (15), 126-129. (Rus.)

12. *Navrodsкая, R. A., Fialko, N. M., Gnedash, G. A., Sbrodova, G. A.* (2017). Enerhoefektyvna teploutylizatsiyna systema dlia pidhrivannia teplomerezhnoi vody ta duttovoho povitria kotliv komunalnoi teploenerhetyky [Energy-efficient heat recovery system for heating the backward heating system water and blast air of municipal boilers]. *Promyslova teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 39(4), 69-75. (Ukr.)

13. *Sigal, A. I.* (2004). Vliyaniye vlagi v dutyevom vozdukhke na effektivnost raboty kotlov promyshlennoy i kommunalnoy energetiki [Effect of moisture in the blown air on the efficiency of the boilers of industrial and municipal energy]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 12, 34-37. (Rus.)

14. *Bukharkin, E. N.* (2004). K voprosu ob uluchshenii ekologicheskikh pokazateley gazoispolzuyushchikh ustanovok [On the issue of improving the environmental performance of gas-using facilities]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 6, 40-42. (Rus.)

15. *Dashevskiy, YU. M., Novikov, B. Ye., Khasanov-Agayev, L. R.* (1991). Nekotoryye ekologicheskiye aspekty vnedreniya prirodookhrannykh i energosberegayushchikh tekhnologiy na TES [Some environmental aspects of the implementation of environmental and energy-saving technologies at TPPs]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 4, 61-63. (Rus.)

Отримано 22.05.2018
Received 22.05.2018