

DOI: 10.31319/2519-2884.47.2025.15

УДК 62.681+66.074.31

Клімов Р.О., к.т.н., доцент, ORCID ID: 0000-0002-7061-7028, e-mail: klroma@ukr.net**Коровін О.О.**, здобувач другого (магістерського) рівня, e-mail: pttep@i.ua

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Klimov Roman, Candidate of technical sciences, Associate professor, Associate professor of the Department of Thermal Power Engineering**Korovin Oleksandr**, master's degree student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРІВ РІЗНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ЗА КОТЕЛЬНИМИ АГРЕГАТАМИ

У роботі наведено методику, яка дає змогу визначити найбільш раціональне поєднання кількості теплоутилізаторів і оптимальний розподіл потоків димових газів між ними, за якого забезпечується досягнення найменшої температури відхідних газів для кожного конкретного режиму функціонування енергетичної установки. Такий підхід дозволяє не лише підвищити ефективність утилізації теплоти скидних потоків котельних агрегатів, а й забезпечити стабільність роботи системи за змінних експлуатаційних умов.

Ключові слова: котел; економайзер; поверхня; насадка; теплота; температура.

The paper presents a methodology that allows you to determine the most rational combination of the number of heat exchangers and the optimal distribution of flue gas flows between them, which ensures the achievement of the lowest exhaust gas temperature for each specific mode of operation of the power plant. This approach allows not only to increase the efficiency of heat utilization of waste flows of boiler units, but also to ensure the stability of the system under variable operating conditions.

Keywords: boiler; economizer; surface; nozzle; heat; temperature.

Постановка проблеми

В умовах сучасного етапу розвитку енергетики питання ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів набуває особливої актуальності. Зростання вартості природного газу та інших енергоносіїв, а також необхідність зменшення негативного впливу на довкілля спонукають до впровадження енергозберігаючих технологій у всіх галузях промисловості та комунального господарства [1—4]. Одним із найбільш дієвих напрямів підвищення енергоефективності теплогенеруючих установок є утилізація теплоти димових газів котлів.

Димові гази, що утворюються в процесі спалювання палива, містять значну кількість невикористаної теплоти. Температура відхідних газів у більшості традиційних котлів становить від 150 до 250 °С, а іноді й вище, що свідчить про наявність значного потенціалу вторинних енергетичних ресурсів [1, 2]. Без їх утилізації ці втрати становлять до 20 % від загальної теплової енергії, що виробляється котлом.

Використання утилізаторів теплоти димових газів — економайзерів, рекуператорів, конденсаційних теплообмінників — дозволяє знизити витрати палива на 5—15 %, підвищити ККД котла, а також скоротити обсяг викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище [3—7]. Це забезпечує не лише економічну вигоду, а й екологічну доцільність, що відповідає цілям сталого розвитку та вимогам чинного законодавства України у сфері енергозбереження [3, 4].

Крім того, утилізація теплоти димових газів сприяє зменшенню навантаження на паливно-енергетичний комплекс держави та підвищенню енергетичної незалежності країни. Тому задача розроблення та впровадження ефективних систем утилізації теплоти димових газів є актуальною та практично значущою для промислових і комунальних підприємств. Задача утилізації теплоти димових газів котлів є актуальною та стратегічно важливою, оскільки поєднує в собі енергозбереження, економічну доцільність і екологічну безпеку. Її вирішення дозволяє під-

вищити ефективність існуючих систем теплопостачання, зменшити енергетичну залежність та сприяти переходу до сучасних стандартів енергоефективності.

Отже, актуальність даної роботи полягає в необхідності підвищення енергоефективності котельних установок шляхом використання вторинних енергетичних ресурсів, зокрема теплоти димових газів, що дозволить зменшити паливно-енергетичні витрати, знизити рівень забруднення довкілля та забезпечити економічну ефективність теплопостачання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Теплоутилізатори типу ЕК-БМ застосовуються для утилізації теплоти димових газів котлів з метою підвищення енергоефективності теплогенеруючих установок [1—4]. Їх основна функція — зниження температури відхідних газів і передача отриманої теплоти воді, що надалі використовується у системах теплопостачання або технологічних процесах.

На відміну від поверхневих теплообмінників, контактні економайзери працюють за принципом прямого контакту газової та рідинної фаз, що забезпечує інтенсивніший тепло- і масообмін [2, 5—7]. Висока ефективність процесу досягається завдяки великій площі поверхні контакту, яка створюється краплями води й елементами насадки всередині апарата.

Типовий економайзер ЕК-БМ складається з вертикального циліндричного корпусу, у верхній частині якого розташована система розпилю води (форсунки або сітчасті розподільники), середня частина заповнена насадкою, а нижня — необхідна для збору нагрітої води. Під час роботи гарячі димові гази проходять крізь шар зрошуваної насадки, де відбувається безпосередній теплообмін між газом і краплями води. У результаті гази охолоджуються, а вода нагрівається. Отримана теплота може бути використана для підігріву живильної води, технологічних розчинів або зворотної води систем опалення [1, 4].

За даними експлуатаційних спостережень, для апаратів типу ЕК-БМ коефіцієнт утилізації теплоти становить 65—85 % залежно від конструкції та режиму роботи [3]. При використанні корозійностійких матеріалів можливе охолодження газів нижче точки роси з утилізацією прихованої теплоти конденсації [2].

Основними перевагами контактних економайзерів є висока інтенсивність теплообміну завдяки великій поверхні контакту фаз; стійкість до забруднень; одночасне очищення газів від пилу та шкідливих водорозчинних домішок; проста конструкція і невисока вартість виготовлення [5—7].

Для підвищення ефективності процесу тепло- і масообміну у контактних теплоутилізаторах широко застосовується насадка типу «Інжехім». Вона належить до регулярних насадок структурованого типу, виготовлених із полімерних або корозійностійких матеріалів (поліпропілен, нержавіюча сталь, склопластик) [2]. Конструкція насадки «Інжехім» являє собою систему об'ємно впорядкованих елементів, що створюють велику питому поверхню контакту між газом і рідиною при низькому гідравлічному опорі. Форма елементів забезпечує рівномірне зрошення та інтенсивне перемішування фаз, що суттєво підвищує ефективність теплообміну. Застосування насадки «Інжехім» у контактних теплоутилізаторах дає змогу підвищити коефіцієнт утилізації теплоти на 10—15 % порівняно з традиційними насадками кільцевого типу [2]. Насадка «Інжехім» є технічно та економічно обґрунтованим рішенням для модернізації контактних теплоутилізаторів типу ЕК-БМ. Вона поєднує високу ефективність теплообміну, корозійну стійкість і простоту обслуговування, що забезпечує її широке застосування у промислових і комунальних котельнях.

Робота котельного агрегату супроводжується зміною його навантаження у часі. Ступінь навантаження економайзера безпосередньо впливає на результативність його функціонування. Аналіз параметрів спільної роботи котельного агрегату та теплових утилізаторів за різної паропроductивності дає змогу визначити оптимальні режими експлуатації системи з позиції мінімізації витрат палива. Використання теплоутилізаторів різної продуктивності та відповідної кількості для встановлення та використання на різних ступенях завантаження котла дозволить підвищити ефективність утилізації теплоти відхідних газів.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є визначення показників сумісної роботи котла при різних ступенях його завантаження, з теплоутилізаторами різних характерних розмірів, які встановлюються в

необхідній кількості, для забезпечення режимів роботи загальної системи на енергоефективних параметрах.

Виклад основного матеріалу

Математична модель функціонування теплоутилізатора за умов часткових навантажень котельного агрегату формується з урахуванням змін основних параметрів — паропродуктивності котла та його коефіцієнта корисної дії. Ці показники впливають на обсяг утворених продуктів згоряння та кінцеву температуру охолодження димових газів після утилізатора. Математична модель роботи теплового утилізатора за котлом приведена в [2].

Водночас вони визначають кількість конденсату, що формується у контактному теплоутилізаторі, і обсяг енергії, яка в ньому акумулюється. Узагальнене математичне представлення моделі наведено нижче.

Витрата газоподібних продуктів згоряння через теплоутилізатор

$$G_{D,t_{22}} = \frac{v_z Q_D \left(\frac{t_z + 273}{273} \right) \rho_z [c_{z1} t_{z1} - c_{\partial} t_{\partial}]}{Q_n^p \eta_D [c_{z1} t_{z1} - c_{z2} t_{z2}]}, \quad (1)$$

де Q_D — теплопродуктивність котла, Вт; v_z — питомий об'єм димових газів, $\text{м}^3/\text{м}^3$; t_{z1}, t_{z2} — температура димових газів на вході та виході з утилізатора, $^{\circ}\text{C}$; ρ_z — густина димових газів при середній температурі, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_z — теплоємність газів, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$; c_{∂} — теплоємність газів при температурі t_{∂} , $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$; η — ККД роботи котла; Q_n^p — нижча робоча теплота згоряння палива, $\text{Дж}/\text{м}^3$.

Витрата води, що подається в утилізатор, визначається з рівняння теплового балансу установки [2].

Необхідна кількість теплоутилізаторів визначається оптимальною швидкістю руху продуктів згоряння в теплоутилізаторі та його радіусом

$$n_{D,t_{22},r} = \frac{G_{D,t_{22}}}{\rho_z \pi \cdot r^2 \omega_p}, \quad (2)$$

де ω_p — швидкість газів в перетині економайзера, $\text{м}/\text{с}$.

Отримане значення $n_{D,t_{22},r}$ округляється до більшого цілого числа.

Поверхневий коефіцієнт теплообміну визначається відповідно до [2].

Температура охолоджених продуктів згоряння знаходиться при рішенні рівняння теплового балансу

$$F \cdot k_{D,t_{22}} \cdot \Delta t_{t_{22}} = W_{D,t_{22}} (t_{\partial 2} - t_{\partial 1}) + G_{D,t_{22}} \cdot c_{\partial 2} t_{\partial 2}. \quad (3)$$

Як правило за котельним або пічним устаткуванням встановлюють групу теплових утилізаторів з однаковими характеристиками кожного. Моделювання роботи теплових утилізаторів ЕК-БМ з діаметром корпусу 2 м проведено в [2]. Використання теплоутилізаторів з діаметром корпусу 1 м може значно змінити якісні та кількісні показники процесу утилізації теплоти відхідних газів. Тому проведемо моделювання сумісної роботи теплоутилізаторів меншого типу-розміру та котла ТП-150 для різних значень відсоткового завантаження котла як і в роботі [1]. Результати моделювання приведені на рис. 1—3.

Як видно з приведених рисунків характер зміни залежностей при використанні утилізаторів меншого розміру, але в більшій кількості, такий самий, як і для ЕК-БМ-2. Але характерною відмінністю є менша амплітуда коливання кінцевих параметрів. Кількість підключених теплоутилізаторів визначалась відповідно до кількості відхідних газів та урахування заокруглення числа теплових утилізаторів до найбільшого цілого числа. Розподіл кількості продуктів згоряння між утилізаторами був рівномірним.

З рис. 1 видно, що кінцева температура газів при використанні більшої кількості утилізаторів меншого розміру, навіть при малих навантаженнях котла є значно меншою ніж при ЕК-БМ-2. Так само і коефіцієнт теплообміну в утилізаторі збільшується, що вказує на роботу теп-

лового утилізатора майже на номінальних параметрах, тобто кожен теплоутилізатор в необхідній кількості для встановлення працює з номінальною продуктивністю. Тим самим є можливим утилізація теплоти до меншого температурного рівня навіть при малій завантаженості котла.

Чим більше завантаження котла, тим до нижчої температури можна охолоджувати газ. Так для навантаження 50 % для ЕК-БМ-2 це майже 46 °С, для ЕК-БМ-1 це 42 °С, а для повного навантаження — 40 °С. Це дозволяє значно підвищити теплову економічність роботи котельної установки і як наслідок знизити витрату палива. Підключаючи більшу кількість утилізаторів меншої продуктивності кожного до котла можна досягти номінальних параметрів їх роботи і як наслідок збільшити утилізовану енергію на проміжних значеннях завантаження котельного устаткування, що видно з рис. 3.

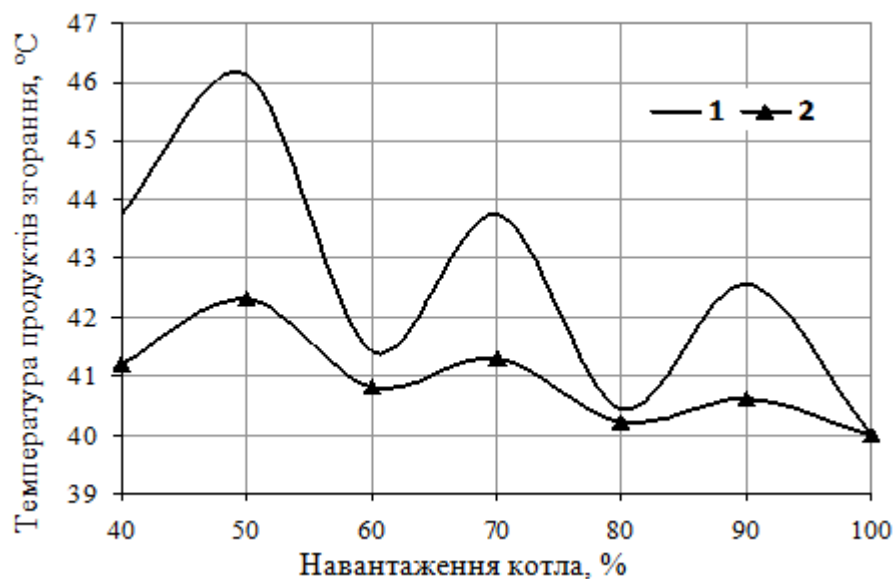


Рис. 1. Залежність кінцевої температури продуктів згорання від навантаження котла; 1 — діаметр утилізатора 2 м; 2 — діаметр утилізатора 1 м

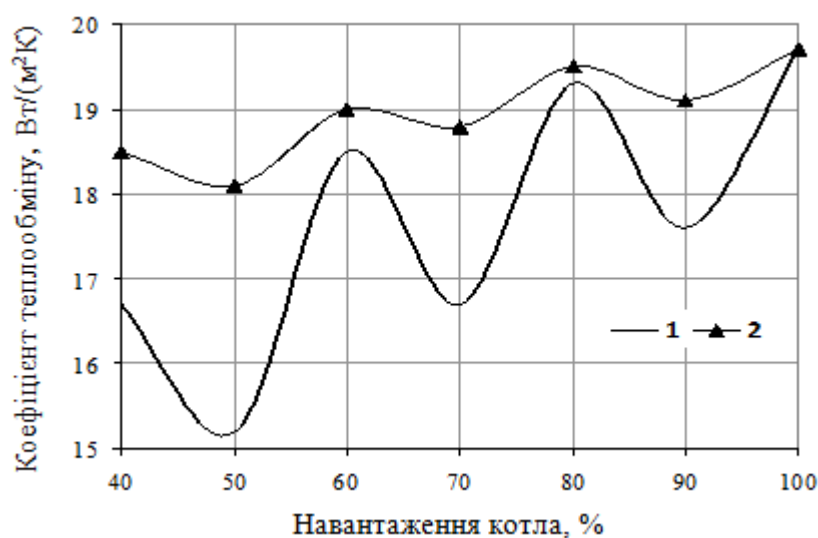


Рис. 2. Залежність коефіцієнта теплообміну в економайзері від навантаження котла

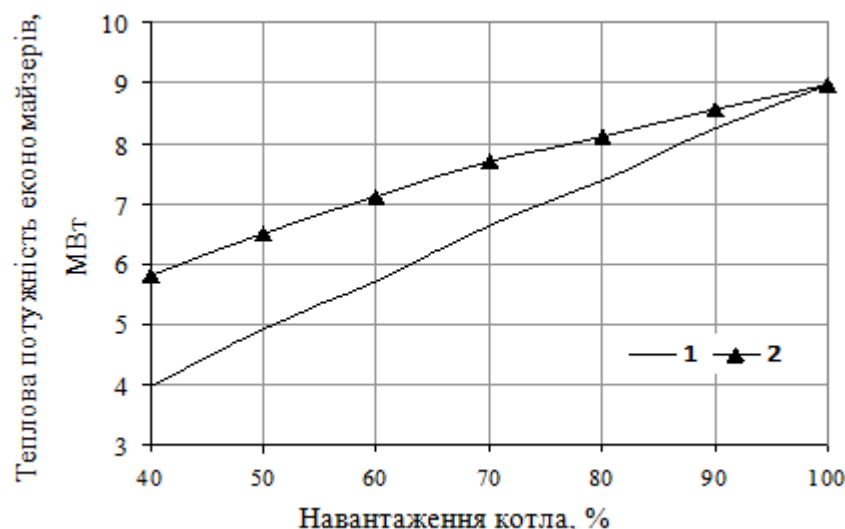


Рис. 3. Залежність потужності утилізаторів від навантаження котла

Висновки

Результати проведених розрахунків сумісної роботи котла та системи теплоутилізаторів свідчать про помітний вплив зміни навантаження котла на можливу температуру охолодження продуктів згоряння на виході з економайзерів. Використання більшої кількості контактних економайзерів меншої продуктивності кожного за котельним агрегатом дозволяє досягнути більшого ефекту охолодження продуктів згоряння за рахунок роботи кожного економайзера на практично номінальних його параметрах. Застосування запропонованої методики дає змогу визначити найбільш раціональне поєднання кількості теплоутилізаторів і оптимальний розподіл потоків димових газів між ними, за якого забезпечується досягнення найменшої температури відхідних газів для кожного конкретного режиму функціонування енергетичної установки. Такий підхід дозволяє не лише підвищити ефективність утилізації теплоти скидних потоків котельних агрегатів, а й забезпечити стабільність роботи системи за змінних експлуатаційних умов.

Список використаної літератури

1. Клімов Р.О. Теплоенергетичні системи промислових підприємств. Навчальний посібник. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. 200 с.
2. Клімов Р.О., Соколовська І.Є., Козирева Я.В. Дослідження режимів сумісної роботи утилізаторів теплоти та котельних агрегатів. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2022. №1(40). С.158–163.
3. Самохвалов В.С. Вторинні енергетичні ресурси та енергозбереження: Навч. пос. К.: ЦУЛ, 2008. 256 с.
4. Маляренко В.А., Немировський І.А. Енергозбереження та енергетичний аудит: Навчальний посіб. Харків: НТУ ХПІ, 2010. 344 с.
5. Jouhara H., Khordehgah N., Almahmoud S., Delpech B., Chauhan A., Tassou S. Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*. №6. 2018. P. 268–289.
6. Maalouf S., Boulawz Ksayer E., Clodic D. Investigation of direct contact condensation for wetflue-gas waste heat recovery using Organic Rankine Cycle. *Energy Convers. Manage.* 107 (2016). P. 96–102.
7. Gellings C.W. Efficient Use and Conservation of Energy - Volume I, Oxford: Eolss Publishers Co. Ltd., 2009.

ENERGY EFFICIENCY OF HEAT RECOVERY UNITS OF DIFFERENT CAPACITIES BY BOILER UNITS

Abstract

In the conditions of the modern stage of development of the energy industry, the issue of efficient use of fuel and energy resources is becoming particularly relevant. The increase in the cost of natural gas and other energy carriers, as well as the need to reduce the negative impact on the environment, encourage the implementation of energy-saving technologies in all branches of industry and utilities. One of the most effective directions for increasing the energy efficiency of heat-generating installations is the utilization of heat from boiler flue gases. The operation of the boiler unit is accompanied by a change in its load over time. The degree of loading of the economizer directly affects the effectiveness of its functioning. The use of heat recovery units of different performance and the corresponding number for installation and use at different stages of boiler loading will allow to increase the efficiency of waste gas heat recovery.

The work determines the indicators of the combined operation of the boiler at different stages of its loading, with heat recovery units of different characteristic sizes, which are installed in the required number, to ensure the operating modes of the overall system at energy-efficient parameters. The results of the calculations of the combined operation of the boiler and the heat recovery system indicate a noticeable impact of the change in the boiler load on the possible cooling temperature of the combustion products at the outlet of the economizers. The application of the proposed method allows you to determine the most rational combination of the number of heat recovery units and the optimal distribution of flue gas flows between them, which ensures the achievement of the lowest exhaust gas temperature for each specific mode of operation of the power plant. This approach allows not only to increase the efficiency of heat recovery of waste flows of boiler units, but also to ensure the stability of the system under variable operating conditions.

References

- [1] Klimov, R.O. (2013). Teploenergetichni sistemi promislovikh pidpriemstv [Heat and power systems and industrial enterprises]. Dniprodzerzhinsk: DDTU [in Ukraine].
- [2] Klimov, R.O., Sokolovska, I.E., & Lusta, E.O. (2022). Doslidzhennya rezhymiv sumisnoyi roboty utylizatoriv teploty ta kotel'nykh ahrehativ [Research into the modes of joint operation of heat recovery units and boiler units]. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, 1(40), 158–163 [in Ukraine].
- [3] Samokhvalov, V.S. (2008) Vtorynni enerhetychni resursy ta enerhozberezhennya [Secondary energy resources and energy saving]. K.: TSUL [in Ukraine].
- [4] Malyarenko, V.A., & Nemyrovs'kyi, I.A. (2010) Enerhozberezhennya ta enerhetychnyy audyt [Energy saving and energy audit]. Kharkiv: NTU KHPI [in Ukraine]
- [5] Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., & Tassou, S. (2018) Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*. No. 6, 268–289.
- [6] Maalouf, S., Boulawz Ksayer, E., Clodic, D. (2016) Investigation of direct contact condensation for wetflue-gas waste heat recovery using Organic Rankine Cycle. *Energy Convers. Manage.* No. 107, 96–102.
- [7] Gellings, C.W. (2009) Efficient Use and Conservation of Energy. *Oxford*. Vol. I.

Надійшла до редакції 20.10.2025

Прийнята після рецензування 21.10.25

Опублікована 23.10.2025