

DOI: 10.31319/2519-2884.40.2022.19

УДК 62.681+66.074.31

**Р.О. Клімов**, к.т.н., доцент, klroma@ukr.net

**І.Є. Соколовська**, к.т.н., доцент, sokolovskaja7887@gmail.com

**Я.В. Козирєва**, магістр, ptter@i.ua

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

## ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ СУМІСНОЇ РОБОТИ УТИЛІЗАТОРІВ ТЕПЛОТИ ТА КОТЕЛЬНИХ АГРЕГАТІВ

*В роботі наведено методику розрахунку сумісної роботи котельного агрегату та утилізаторів теплоти відхідних газів при різних ступенях навантаження системи. Дана методика дозволяє визначити оптимальну кількість включених утилізаторів та розподіл продуктів згоряння між ними. Тим самим можна досягти мінімального значення температури газів з установки і зменшити забруднення навколишнього середовища.*

**Ключові слова:** котел; утилізатор; поверхня; насадка; теплообмін; температура.

*The method of calculation joint work of the boiler unit and utilizers of heat exhaust gases at different degrees of system loadings is resulted in work. This technique allows you to determine the optimal number of included utilizers and the distribution of combustion products between them. In this way, it is possible to achieve a minimum value of the temperature exhaust gases from the installation and to reduce environmental pollution.*

**Keywords:** boiler; utilizer; surface; filling; heat transfer; temperature.

### Постановка проблеми

Для роботи промислових підприємств необхідна велика кількість енергетичних ресурсів. Ефективність їх використання характеризується станом впровадження сучасних енергоефективних технологій у виробництво та розробленням нових типів устаткування. Як правило, витрати палива обладнанням залежать від його коефіцієнта корисної дії, тобто від ефективності протікання процесів спалювання та перетворення у інші види енергії. Враховуючи долю споживання енергетичних ресурсів потужними промисловими підприємствами у загальному балансі споживання світу, можна показати, що на даному етапі розвитку техніки, первинна енергія використовується недостатньо ефективно, більшою мірою перетворюючись у скидку теплоту, яку не використовують. Цей вторинний ресурс має суттєвий енергетичний потенціал, але ж його утилізація та використання поверненої енергії в цикл виробництва, як правило, стикаються з деякими обмеженнями. Підвищення рівня використання вторинних енергетичних ресурсів дозволяє знизити споживання первинних, вартість яких невпинно зростає, та вирішити питання покращення екологічної обстановки в місцях встановлення великих підприємств. Тобто можна одночасно вирішити як матеріальний бік проблеми, так і екологічний.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

При роботі теплотехнічних агрегатів та установок утворюється велика кількість вторинних енергоресурсів, як теплових, так і горючих, що залежить від типу та ефективності обладнання. Основними є втрати з відхідними продуктами згоряння. Їх кінцева температура обмежується можливістю конденсації водяної пари при досягненні точки роси димових газів. У таких енергетичних об'єктах температура відхідних газів, як правило, становить понад 110 °С і в першу чергу залежить від типу використовуваного палива [1—3].

Розглядаючи тенденції зменшення теплових викидів, слід зазначити досяжну температуру охолодження продуктів згоряння в теплотехнічних агрегатах. Використовуючи лише енергетичні баланси не можна точно вказати це значення, а застосовуючи ексергетичні баланси можна назвати оптимальне значення лише на рівні 40 °С, при прийнятому значенні температури навколишнього середовища.

В основному величезні втрати теплових вторинних енергоресурсів зменшують шляхом встановлення хвостових поверхонь нагріву, якими є економайзери та підігрівачі повітря [3, 4]. Це рекуперативні або регенеративні типи теплообмінників, а, як відомо, найкращою ефективністю в роботі відрізняється контактний тип. Найпоширенішим контактним типом економайзера є ЕК-БМ у якому для розвинення поверхні тепломасообміну використовують різні типи насадок [2, 5—7]. У кожному конкретному випадку ефективність використання насадок може бути оцінена різними показниками, але враховуючи те різноманіття типів насадок, для порівняння їх енергетичної ефективності доцільним є використання показника приведенного в [2].

Робота котельного агрегату характеризується змінами його основних параметрів у часі, які значною мірою залежать від ступеня навантаження котла. Робота теплових утилізаторів при цьому може характеризуватися зміною енергетичних показників використання теплоти відхідних газів в широких межах. Ступінь завантаження економайзера відбивається на ефективності його роботи. Визначення параметрів спільної роботи теплових утилізаторів та котельного агрегату при зміні його теплопродуктивності (паропродуктивності) дозволить визначити найбільш раціональні режими роботи системи з погляду економії палива.

### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є визначення характерних показників сумісної роботи котельного агрегату при різних ступенях його навантаження, з теплоутилізаторами встановленими в необхідній кількості, для отримання найбільш ефективних режимів роботи системи.

### Виклад основного матеріалу

Математична модель роботи теплоутилізатора при часткових навантаженнях котельного агрегату визначається змінами основних параметрів, таких як паропродуктивність котла та його ККД залежно від навантаження, що в свою чергу впливають на вихід продуктів згорання та кінцеву температуру охолодження димових газів після утилізатора. Також це визначає кількість конденсату, який утворюється в контактному утилізаторі та кількість збереженої в ньому енергії. Загальний вигляд математичної моделі наведено нижче.

Теплопродуктивність котла [1]

$$Q(D) = D[(i_{nn} - i_{жв}) + \alpha_{np}(i_{кв} - i_{жв})], \quad (1)$$

де  $D$  — паропродуктивність котла, кг/с;  $i_{nn}, i_{жв}, i_{кв}$  — ентальпія перегрітої пари, живильної та котлової води, Дж/кг;  $\alpha_{np}$  — частка продування.

Витрата газоподібних продуктів згорання через теплоутилізатор

$$G(D, t_{22}) = \frac{v_2 Q(D) \left( \frac{t_2 + 273}{273} \right) \rho_2 [c_{21} t_{21} - c_{\partial} t_{\partial}]}{Q_n^p \eta (D) [c_{21} t_{21} - c_{22} t_{22}]}, \quad (2)$$

де  $v_2$  — питомий об'єм утворених продуктів згорання, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $t_{21}, t_{22}$  — температура газів на вході та виході з утилізатора, °С;  $t_2$  — середня температура газів в утилізаторі, °С;  $\rho_2$  — густина продуктів згорання при середній температурі, кг/м<sup>3</sup>;  $c_2$  — теплоємність газів, Дж/(кг·К);  $c_{\partial}$  — теплоємність газів, які відходять до димової труби при температурі  $t_{\partial}$ , Дж/(кг·К);  $Q_n^p$  — нижча робоча теплота згорання палива, Дж/м<sup>3</sup>;  $\eta$  — ККД роботи котла.

Витрата води, що подається в утилізатор, визначається з рівняння теплового балансу установки [5]

$$W(D, t_{22}) = \frac{G(D, t_{22}) [c_2 (t_{21} - t_{22}) + d_n (i_n - c_{e1} t_{e1}) - d_k (i_k - c_{e2} t_{e2})]}{c_{e2} t_{e2} - c_{e1} t_{e1}}, \quad (3)$$

де  $i_n, i_k$  — ентальпія водяної пари в продуктах згорання при температурах на вході та виході з утилізатора, Дж/кг;  $d_n, d_k$  — вологовміст продуктів згорання на вході та виході з утилізатора, кг/кг;  $t_{e1}, t_{e2}$  — температура води на вході та виході з утилізатора, °С;  $c_e$  — теплоємність води, Дж/(кг·К).

Температурний напір [1]

$$\Delta(t_{22}) = \frac{(t_{21} - t_{62}) - (t_{22} - t_{61})}{\ln \frac{t_{21} - t_{62}}{t_{22} - t_{61}}}. \quad (4)$$

Кількість теплоутилізаторів визначається за умови забезпечення оптимальної швидкості руху продуктів згорання у просторі теплоутилізатора

$$n(D, t_{22}) = \frac{G(D, t_{22})}{\rho_2 \pi r^2 \omega_p}, \quad (5)$$

де  $r$  — радіус утилізатора, м;  $\omega_p$  — рекомендована швидкість руху газів, м/с.

Отримане значення  $n(D, t_{22})$  округляється у більший бік до цілого числа. Тоді дійсна швидкість руху газів у вільному перетині утилізатора

$$\alpha(D, t_{22}) = \frac{G(D, t_{22})}{\rho_2 \pi^2 n}. \quad (6)$$

Щільність зрошення насадки [5]

$$u(D, t_{22}) = \frac{W(D, t_{22}) \cdot \alpha(D, t_{22}) \cdot \rho_2}{G(D, t_{22}) \cdot v \cdot \rho_g}, \quad (7)$$

де  $\rho_g$  — густина води при середній температурі, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  — вільний об'єм насадки, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Поверхневий коефіцієнт теплообміну [2, 5]

$$k_f(D, t_{22}) = \frac{1,334 \cdot 10^{-6} \lambda_2 \cdot u(D, t_{22})^{0,7} \left( \frac{\alpha(D, t_{22}) \cdot g}{\nu_2} \right)^{0,8}}{f^{0,5} \nu^{0,3} \nu_g^{0,7}}, \quad (8)$$

де  $\lambda_2$  — коефіцієнт теплопровідності газу при середній температурі  $t_2$ , Вт/(м·К);  $\nu_2$ ,  $\nu_g$  — кінематична в'язкість газу та води, м<sup>2</sup>/с;  $f$  — питома поверхня насадки, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

Як видно з рівняння (8) поверхневий коефіцієнт теплообміну найбільшою мірою залежить від геометричних параметрів насадки, також щільності зрошення при постійних теплофізичних властивостях потоків.

Кінцева температура охолодження продуктів згорання може бути знайдена рішенням рівняння

$$F \cdot k_f(D, t_{22}) \cdot \Delta(t_{22}) = W(D, t_{22})(t_{62} - t_{61}) + G(D, t_{22}) \cdot c_{62} t_{62}. \quad (9)$$

Система рівнянь (1)—(9) дозволяє розрахувати роботу утилізатора теплоти продуктів згорання при частковому навантаженні котельного агрегату, а також обов'язково повинна включати балансові рівняння для визначення температури мокрого термометра відхідних газів. Завдання вирішується методом ітерацій при первинно невизначеному значенні температури води на виході з утилізатора. Ця температура також залежить від температури мокрого термометра, яка визначається станом газового середовища в утилізаторі.

Моделювання роботи проводимо для контактних економайзерів ЕК-БМ-2 із насадкою Інжехім, встановлених після парового котла ТП-150. Для розрахунків за моделлю (1)—(9) приймаємо інтервал варіювання відсоткового навантаження котла на рівні 40, 50...100 %. Результати розрахунків приведені на рис. 1—3.

З рис. 1 видно, що температура газів на виході з контактної теплоутилізатора не однакова на всіх режимах роботи котла, це обумовлено різною кількістю підключених економайзерів (40 % — 3 шт., 50—60 % — 4 шт., 70—80 % — 5 шт., 90—100 % — 6 шт.). Чим більший рівень навантаження котла, тим до меншої температури можна охолоджувати відхідні газу. Так для навантаження 50 % це майже 46 °С, а для повного навантаження — 40 °С. Це, у свою чергу, як відомо з основних принципів розгляду роботи котельних агрегатів, безпосередньо впливає на загальну теплову економічність установки та витрату первинного палива. Враховуючи вартість палива, можна показати, що протягом року це значна економія. Зниження температури відхідних газів також впливає на рівень теплового забруднення навколишнього середовища, а зниження витрати палива на котел — на рівень викидів забруднюючих речовин у ґрунт, повітря, воду.

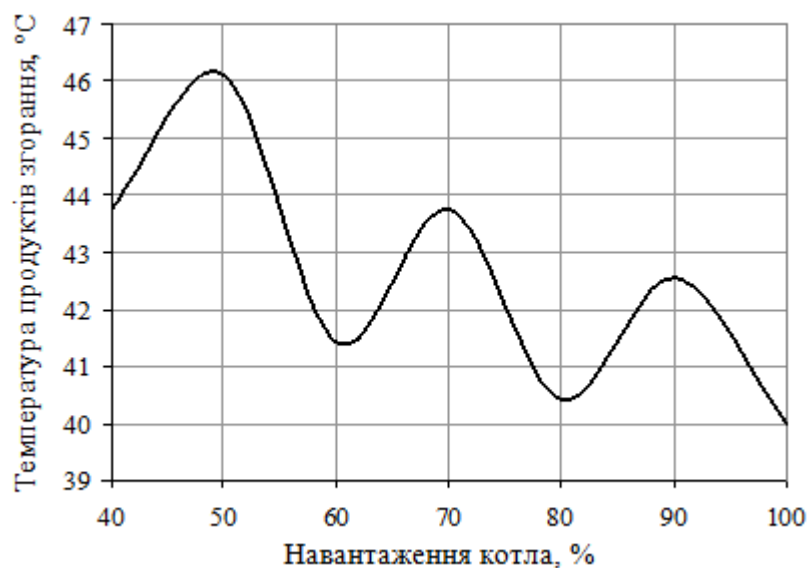


Рис. 1. Залежність температури продуктів згорання на виході з економайзера від потужності котла

З рис. 2 видно, що найменшу теплову ефективність економайзери мають при навантаженні близько 40 % потужності котла, а найвищу — при номінальному навантаженні. Це зумовлено кількістю димових газів, що проходять через утилізатор — чим більше газів утилізується, тим більша теплова ефективність установок. Характер зміни є майже лінійною залежністю, з якої випливає, що при збільшенні навантаження котла зростання потужності економайзера йде повільніше, ніж первинний параметр. Тобто, при збільшенні потужності котла, наприклад, вдвічі, економія теплової енергії не збільшиться на відповідну величину.

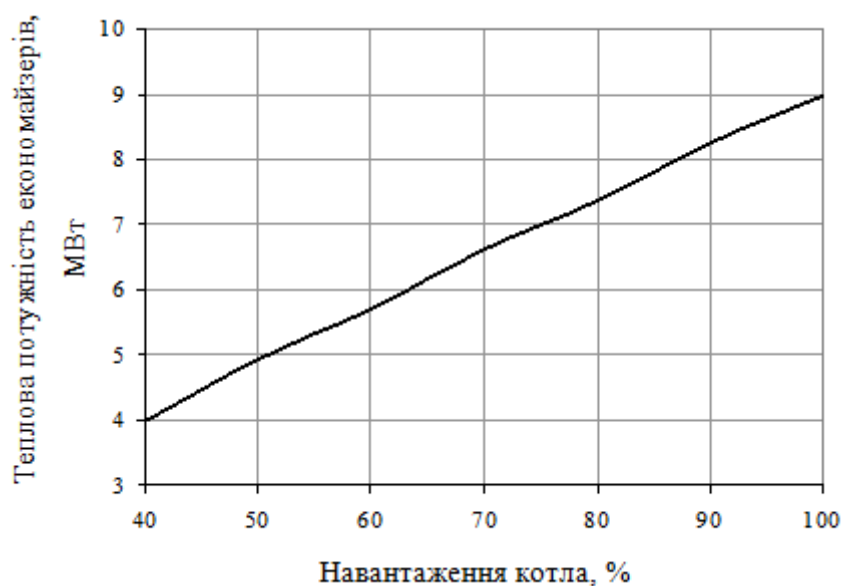


Рис. 2. Залежність теплової потужності економайзерів від навантаження котла

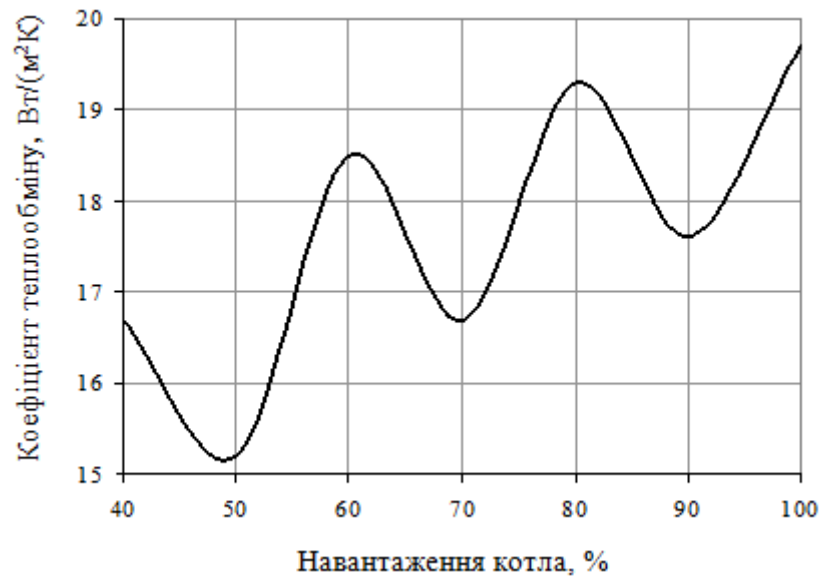


Рис. 3. Залежність коефіцієнта теплообміну від потужності котла

Коефіцієнт теплообміну в об'ємі економайзера визначає теплову ефективність його роботи (рис. 3). Залежність коефіцієнта теплообміну від потужності котла прямопропорційно залежить від швидкості газів у теплоутилізаторі. Вплив на коефіцієнт теплообміну має також щільність зрошення насадки, яка, у свою чергу, визначається також швидкістю руху димових газів в апараті. Зміна температурного напору обумовлена різною кількістю підключення економайзерів і безпосередньо залежить від температури відхідних газів після утилізатора.

#### Висновки

Результати розрахунків спільної роботи котельного агрегату з теплоутилізаторами показують суттєві зміни можливої температури охолодження продуктів згорання за котлом за умови зміни навантаження котла. З використанням наведеної методики можна визначити таке поєднання кількості утилізаторів і різний розподіл між ними продуктів згорання, при якому може бути досягнута оптимальна температура газів для кожного конкретного режиму роботи установки.

#### Список використаної літератури

1. Клімов Р.О. Теплоенергетичні системи промислових підприємств. Навчальний посібник. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. 200 с.
2. Клімов Р.О., Кирилюк В.О. Ефективність роботи насадок контактних утилізаторів теплоти. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2021. №1(38). С. 92–98.
3. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: МЭИ, 2009. 472 с.
4. Губинский В.И. Металлургические печи. Учебное пособие. Днепропетровск: НМетАУ, 2006. 85 с.
5. Кудинов А.А. Энергосбережение в теплогенерирующих установках. Ульяновск: УлГТУ, 2000. 139 с.
6. Таубман Е.И., Корнев В.А., Мельтцев В.А. Контактные теплообменники. М.: Химия, 1987. 256 с.
7. Лаптев А.Г., Фарахов Т.М., Дударовская О.Г. Эффективность явлений переноса в каналах с хаотичными насадочными слоями. Спб.: Страта, 2016. 214 с.

## INVESTIGATION OF MODES JOINT OPERATION OF HEAT UTILIZERS AND BOILER UNITS

Klimov R., Sokolovska I., Kozyreva Y.

### Abstract

Given the share of energy consumption by powerful industrial enterprises in the overall balance of world consumption, it can be shown that at this stage of technology development, primary energy is not used efficiently enough, turning more into unused heat. Increasing the use of secondary energy resources reduces the consumption of primary resources, the cost of which is constantly growing, and solves the problem of improving the environmental situation in the locations of large enterprises. Thermal secondary energy losses are reduced by installing tail heating surfaces, such as economizers and air heaters.

The operation of the boiler unit is characterized by changes in its basic parameters over time, largely depending on the degree of load on the boiler. The degree of loading of the economizer affects the efficiency of its work. Determining the parameters of joint operation of heat recovery units and the boiler unit with changes in heat capacity will determine the most rational modes of operation of the system in terms of fuel economy.

The aim of the study is to determine the characteristic indicators of joint operation of the boiler unit at different degrees of its load, with heat recovery units installed in the required amount to determine the most efficient modes of operation of the system.

Economizers have the lowest thermal efficiency at a load of about 40% of the boiler power, and the highest at rated load. The results of calculations of the joint operation of the boiler unit with heat recovery units show significant changes in the possible cooling temperature of the combustion products behind the boiler when the boiler load changes. Using the above technique, it is possible to determine such a combination of the number of utilizers and different distribution of combustion products between them, at which the optimal gas temperature can be achieved for each specific mode of operation of the installation.

### References

- [1] Klimov, R.O. (2013). *Teploenergetichni sistemi promislovikh pidpriemstv [Heat and power systems and industrial enterprises]*. Dniprodzerzhinsk: DDTU [in Ukrainian].
- [2] Klimov, R.O., & Kyrlyuk, V.O. (2021) Efektyvnist roboty nasadok kontaknykh utylizatoriv teploty [Efficiency of the nozzles of contact heat exchangers]. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, 1(38), 92–98 [in Ukrainian].
- [3] Sokolov, E. (2009). *Teplofikatsiya i teplovyie seti [Heating and heating networks]*. M.: MEI [in Russian].
- [4] Gubinskiy, V.I. (2006). *Metallurgicheskiye pechi [Metallurgical furnaces]*. Dnepropetrovsk: NMetAU [in Ukrainian].
- [5] Kudinov, A.A. (2000). *Energoberezhniye v teplogeneriruyushchikh ustanovkakh [Energy saving in heat generating plants]*. Ulianovsk: UIGTU [in Russian].
- [6] Taubman, E.I., Kornev, V.A., & Mel'tsev, V.A. (1987). *Kontaknyye teploobmenniki [Contact heat exchangers]*. M.: Khimiya [in Russian].
- [7] Laptev, A.G., Farakhov, T.M., & Dudarovskaya, O.G. (2016). *Effektivnost yavleniy perenosa v kanalakh s khaotichnymi nasadochnymi sloyami [Efficiency of transport phenomena in channels with chaotic packed beds]*. Spb.: Strata [in Russian].