

УДК 697.54

доцент, **Богдан Федяй**,
fed_bn@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6323-7185,
ТОВ «Науково-технічне підприємство «АЛЬМАГРУП»

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ЖИВИЛЬНОЇ ВОДИ НА ВХОДІ В ЖАРОТРУБНИЙ ПАРОВИЙ КОТЕЛ З ЕКОНОМАЙЗЕРОМ НЕКИПЛЯЧОГО ТИПУ

***Анотація.** У тепловому балансі жаротрубних парових котельних агрегатів втрати теплової енергії з відхідними продуктами горіння є найбільшими. Встановлення економайзерів не киплячого типу з метою утилізації теплової енергії відхідних димових газів у виробничих котельнях на базі жаротрубних котельних агрегатів є поширеною практикою. У той же час недостатня увага приділяється аналізу температурного режиму живильної води на виході з економайзера, перед подачею в жаротрубний котел, та її впливу на коефіцієнт корисної дії котлоагрегату. В статті досліджено зміну ефективності жаротрубних парових котельних агрегатів середньої потужності залежно від температури живильної води при застосуванні економайзерів не киплячого типу. Визначено оптимальну температуру живильної води та оцінено доцільність застосування економайзерів з метою утилізації теплової енергії відпрацьованих продуктів горіння.*

Ключові слова: економайзер, живильна вода, паровий котел, теплоутилізатор, димові гази, теплова ефективність.

Вступ. Жаротрубні парові котельні агрегати широко використовуються як джерело теплової енергії в різних технологічних циклах виробництва, завдяки високому ККД в межах 88-93%. Проте постійне зростання вартості енергоносіїв, необхідність суттєвого зменшення викидів парникових газів до навколишнього середовища зумовлюють потребу у впровадженні в теплових схемах котелень сучасних технологічних заходів, спрямованих на зменшення споживання викопних видів палива та скорочення їхнього використання шляхом спалювання.

Актуальність дослідження. У тепловому балансі жаротрубних котлів втрати теплоти з відхідними димовими газами становлять від 6 до 12 %, сумарні втрати теплоти від неповного хімічного згоряння і в навколишнє середовище – близько 0,14-1%. Як наслідок, поширеним методом підвищення теплової ефективності таких котлів є використання економайзерів [1-5, 7]. Вважається, що з одного боку, це забезпечує утилізацію теплоти відхідних димових газів за

рахунок зниження їхньої температури, а з іншого – підвищення температури живильної води та зменшення витрат енергії палива на виробництво водяної пари. Проте, збільшення температури живильної води в окремих випадках призводить до відхилення теплопродуктивності котельного агрегату від номінального значення та падіння його ККД. З огляду на викладене, виникає проблема визначення експлуатаційних параметрів теплової схеми котельні, при яких використання економайзерів є доцільним.

Останні дослідження та публікації. Підвищення ефективності котла з економайзером визначають методом непрямого теплового балансу шляхом оцінювання втрат теплоти з димовими газами до встановлення економайзера і після нього. ККД газового котла за методом непрямого теплового балансу, викладеного в нормативному методі теплового розрахунку котлів та [6], визначається за формулою

$$\eta^t = 100 - q_2^t - q_3 - q_5 \quad (1)$$

де: η^t – ККД котла при заданій температурі живильної води на вході в котел, %; q_2^t – втрати теплової енергії з відпрацьованими димовими газами при заданій температурі живильної води, %; q_3 – втрати теплової енергії при неповному хімічному згорянні палива, %; q_5 – втрати теплової енергії муруванням котельного агрегату до навколишнього середовища, %.

Відповідно до нормативного методу теплового розрахунку котельних агрегатів та [6] втрати теплової енергії з відхідними димовими газами визначаються залежністю, %:

$$q_2^t = \frac{\sum V_{\text{д.г.}} \cdot c_{\text{д.г.}} \cdot t_{\text{д.г.}} - Q_{\text{нов}}^{\text{фіз}} - Q_{\text{нал}}^{\text{фіз}}}{Q_H^P} \cdot 100, \quad (2)$$

де $V_{\text{д.г.}}$ – об'єм димових газів, що утворюються при спалюванні природного газу, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $c_{\text{д.г.}}$ – об'ємна теплоємність продуктів згоряння при температурі димових газів $t_{\text{д.г.}}$, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; $Q_{\text{нов}}^{\text{фіз}}$ та $Q_{\text{нал}}^{\text{фіз}}$ – відповідно, фізична теплова енергія повітря й палива, що надходять в топку котла для забезпечення процесу сумішоутворення, приведена до 1 м^3 палива, $\text{кДж}/\text{м}^3$; Q_H^P – нижча теплота згоряння палива, $\text{кДж}/\text{м}^3$; $t_{\text{д.г.}}$ – температура димових газів після котла або економайзера (за його наявності), $^\circ\text{C}$.

На стадії проєктних робіт температура димових газів може бути визначена як результат теплового розрахунку котла та економайзера. Розрахунки за рівняннями (1) і (2) показують, що в більшості випадків використання

економайзера не киплячого типу підвищує ККД котлів у середньому на 6-8 % [7]. Проте досвід експлуатації котельних агрегатів, обладнаних економайзерами не киплячого типу, у деяких випадках свідчить про відсутність теплотехнічного ефекту від цього типу теплоутилізаторів та зниження ККД. Залежність ККД котла від температури живильної води проілюстровано на рис. 1.

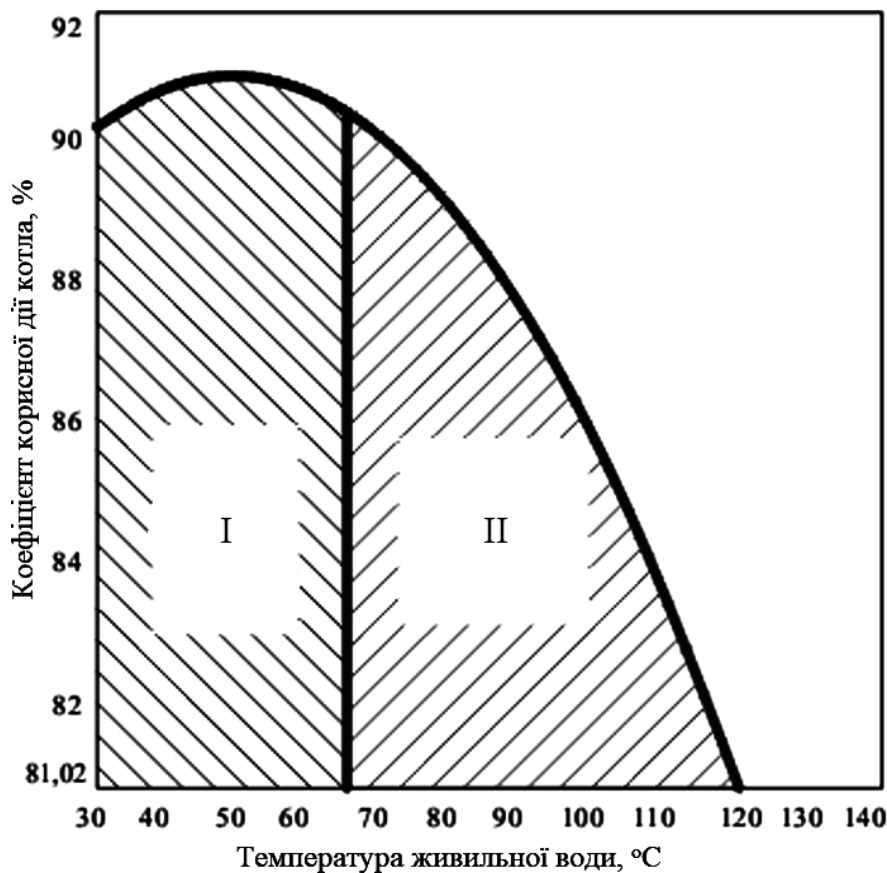


Рис. 1. Зміна ККД жаротрубних котлів в залежності від температури живильної води на вході в котел (адаптовано з [8]):

- I – режим конденсації водяної пари з продуктів згоряння;
- II – режим без конденсації водяної пари з продуктів згоряння

Підвищення температури живильної води після догрівання в економайзері перед подаванням до котельного агрегату, відбувається за рахунок охолодження продуктів згоряння. У свою чергу, це призводить до одночасного зменшення середньої логарифмічної різниці температур між температурою котлової води та температурою димових газів і до зменшення ступеня охолодження продуктів згоряння в топковій камері та конвективних пучках котельного агрегату. Як наслідок, збільшується частка втрат теплоти з продуктами згоряння в паровому котлі, але встановлення економайзера дозволяє нівелювати цей вид тепловтрат.

Невідповідність між аналітичною оцінкою і фактичним значенням ККД котельного агрегату пов'язана з тим, що метод зворотного теплового балансу не

враховує вплив температури живильної води на інтенсивність теплообміну в паровому котлі та ступінь охолодження димових газів. Це унеможливорює коректну оцінку теплового балансу котла та економайзера окремо або як єдиного агрегату.

Формулювання цілей статті. Метою досліджень є аналітичне визначення температури живильної води після економайзера не киплячого типу, яка забезпечить максимальний ККД жаротрубного парового котла.

Основна частина. Як було зазначено вище, досвід експлуатації котлів показує, що значний вплив на паливну ефективність парових котлів має температура живильної води на вході в котел (рис. 1). Це пов'язано з тим, що ступінь охолодження димових газів у котлі залежить від температури живильної води на вході в котел. Чим менша температура живильної води, тим менша температура димових газів на виході з котельного агрегату. Однак, конструктивні особливості жаротрубних неконденсаційних котлів накладають обмеження на значення температури живильної води під час їхньої експлуатації. Зокрема, виготовлення поверхонь теплообміну котла з вуглецевої сталі обмежує температуру живильної води на вході в котельний агрегат на рівні не нижче температури точки роси, збільшеної на 5 °С, тобто для котлів на газоподібному паливі близько 60 °С. У випадку роботи котла при нижчих температурах живильної води буде відбуватися конденсація водяної пари з димових газів на конвективних поверхнях нагрівання котла, що призведе до їхнього швидкого зносу внаслідок корозії. Виходячи з вищесказаного, для неконденсаційних котлів з жаротрубною поверхнею нагріву з вуглецевої сталі максимальний ККД, як правило, відповідає температурі живильної води на вході в котел на рівні 45-65 °С, а температура продуктів згоряння на виході з котла 210-220 °С.

У більшості випадків живлення парового котла здійснюється відповідно до теплової схеми, показаної на рис. 2. Вода з деаератора з температурою 104 °С проходить крізь теплообмінник другого ступеня, частково охолоджується і групою живильних насосів подається до економайзера для повторного підігрівання.

Мінімальна температура живильної води, що надходить в економайзер, зазвичай визначається типом економайзера. Для неконденсаційних економайзерів, виготовлених з вуглецевої сталі, з метою запобігання корозії поверхонь нагрівання, вона повинна бути не нижче 65°С. Використання конденсаційних економайзерів з нержавіючої сталі дозволяє подавати живильну воду з температурою, нижчою за температуру точку роси продуктів згоряння, тобто нижчою за 55°С, що забезпечує більш глибоке охолодження димових газів. Однак, економайзери першого типу є більш поширеними внаслідок значно нижчої вартості.

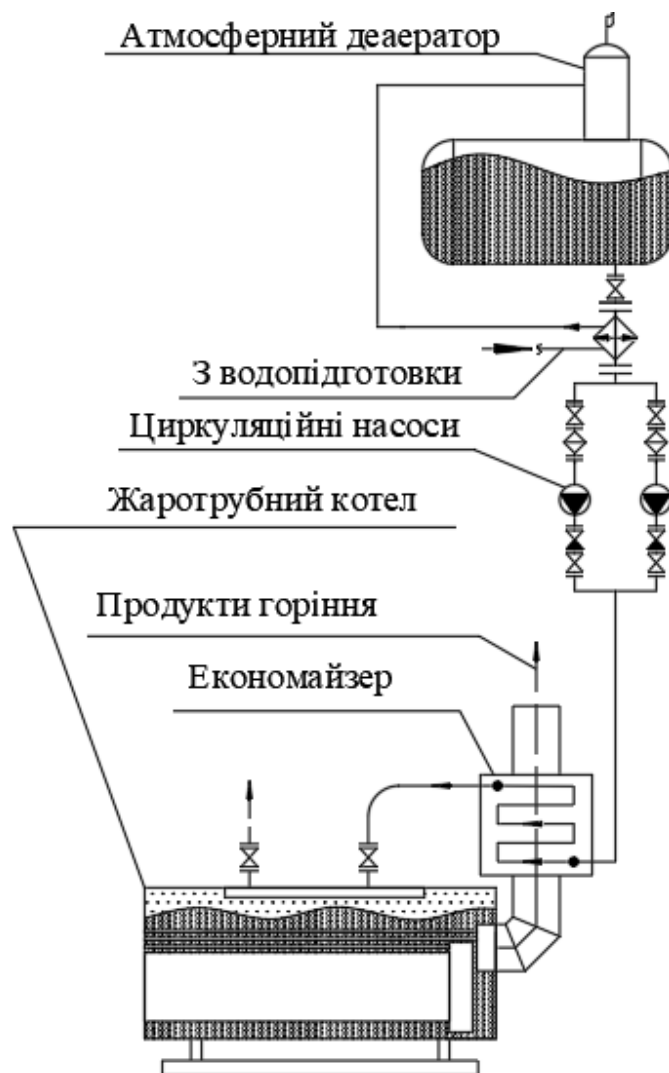


Рис. 2. Теплова схема подачі живильної води в жаротрубний котел

У жаротрубному газовому котлі хімічна енергія палива перетворюється на теплову і передається шляхом радіаційно-конвективного теплообміну й теплопровідності теплоносію, що циркулює в екранах теплообмінника. Таким чином, зі збільшенням різниці ентальпій насиченої пари і живильної води, за рахунок зниження температури живильної води, відбувається більше охолодження продуктів згоряння і підвищується ККД котла. Останнє підтверджується результатами натурних вимірювань, наведеними в роботі [8].

Досвід експлуатації жаротрубних котлів доводить, що вплив температури живильної води на втрати теплоти, зумовлені неповним хімічним згорянням палива, і на втрати тепла стінками котла в навколишнє середовище є незначним. Тому в першому наближенні для спрощення розв'язання поставленої задачі вважатимемо, що складові рівняння (1) q_3 , q_5 не залежать від температури живильної води.

Тоді, згідно з рівнянням (1), втрати теплоти з димовими газами при заданій температурі живильної води становитимуть, %:

$$q_2^t = 100 - \eta^t - q_3 - q_5 \quad (3)$$

Тоді, з рівняння (2), ентальпія продуктів згоряння $I_{\partial.з.}$ на виході з котла становить, кДж/нм³:

$$\sum V_{\partial.з.} \cdot c_{\partial.з.} \cdot t_{\partial.з.} = \frac{q_2^t \cdot Q_H^p}{100} + Q_{нов}^p + Q_{нал}^p = I_{\partial.з.} \quad (4)$$

У загальному тепловому балансі котла, обладнаного економайзером, втрати теплоти до навколишнього середовища поверхнею економайзера є несуттєвими, тому в першому наближенні ними можна знехтувати. Тоді тепловий баланс живильної води в рівнянні економайзера можна записати, кВт:

$$Q_{\partial.з.} = Q_{ж.в.}, \quad (5)$$

де $Q_{ж.в.}$ – кількість теплоти, що передається продуктами згоряння живильній воді, яка протікає через економайзер. Визначається за рівнянням теплового балансу продуктів згоряння в економайзері по формулі, кВт:

$$Q_{\partial.з.} = \frac{B_p \cdot (I_{\partial.з.} - I_{\partial.з.}^{вих})}{3600}, \quad (6)$$

де B_p – витрата палива котла при заданому тепловому режимі, нм³/год; $I_{\partial.з.}^{вих}$ – ентальпія продуктів згоряння на виході з економайзера, кДж/нм³.

Кількість теплової енергії, яка віддається продуктами згоряння живильній воді при проходженні через економайзер, кВт:

$$Q_{\partial.з.} = \frac{c_v \cdot D_v \cdot (t_{ж.в.} - t_{вх}^{ек})}{3600}, \quad (7)$$

де c_v – теплоємність живильної води, кДж/(кг °С); D_v – витрата живильної води, кг/год; $t_{ж.в.}$ – температура живильної води на виході з економайзера, °С; $t_{вх}^{ек}$ – температура живильної води на вході в економайзер, °С.

Якщо рівняння (6), (7) розв'язати сумісно відносно $I_{\partial.з.}^{вих}$, і якщо відома температура живильної води на виході з економайзера, отримаємо, кДж/нм³:

$$I_{\partial.з.}^{вих} = I_{\partial.з.} - \frac{c_{\partial} \cdot D_{\partial} \cdot (t_{ж.в.} - t_{вх}^{ек})}{B_p} \quad (8)$$

Тоді температура димових газів на виході з економайзера визначатиметься рівнянням, °С:

$$t_{\partial.з.} = \frac{I_{\partial.з.}^{вих}}{V_{\partial.з.} \cdot c_{\partial.з.}} \quad (9)$$

Приріст ефективності за рахунок встановлення економайзера можна оцінити за формулою, %:

$$\Delta\eta = \frac{Q_{ж.в.}}{B_p \cdot Q_H^P} \cdot 100 \quad (10)$$

Тоді загальний ККД котла з економайзером визначається залежністю, %:

$$\eta_{tot} = \eta^t + \Delta\eta \quad (11)$$

З огляду на викладене вище, рівняння (1), яке б дозволило оцінити паливну ефективність котлоагрегату, обладнаного не киплячим економайзером, доцільно записати у вигляді:

$$\eta_{tot} = 100 - q_2 - q_3 - q_5 + \Delta\eta \quad (12)$$

Подальше розв'язання рівнянь (2)-(11) разом з даними на рис. 1 дає можливість оцінити доцільність застосування неконденсаційного економайзера не киплячого типу для підвищення ККД котла.

На рис. 3 і в табл. 1 наведено результати, отримані за запропонованою методикою розрахунку при різних значеннях температури живильної води для жаротрубного котла з такими параметрами: витрата живильної води – 168 кг/год, абсолютний тиск пари в котлі – 12 бар.

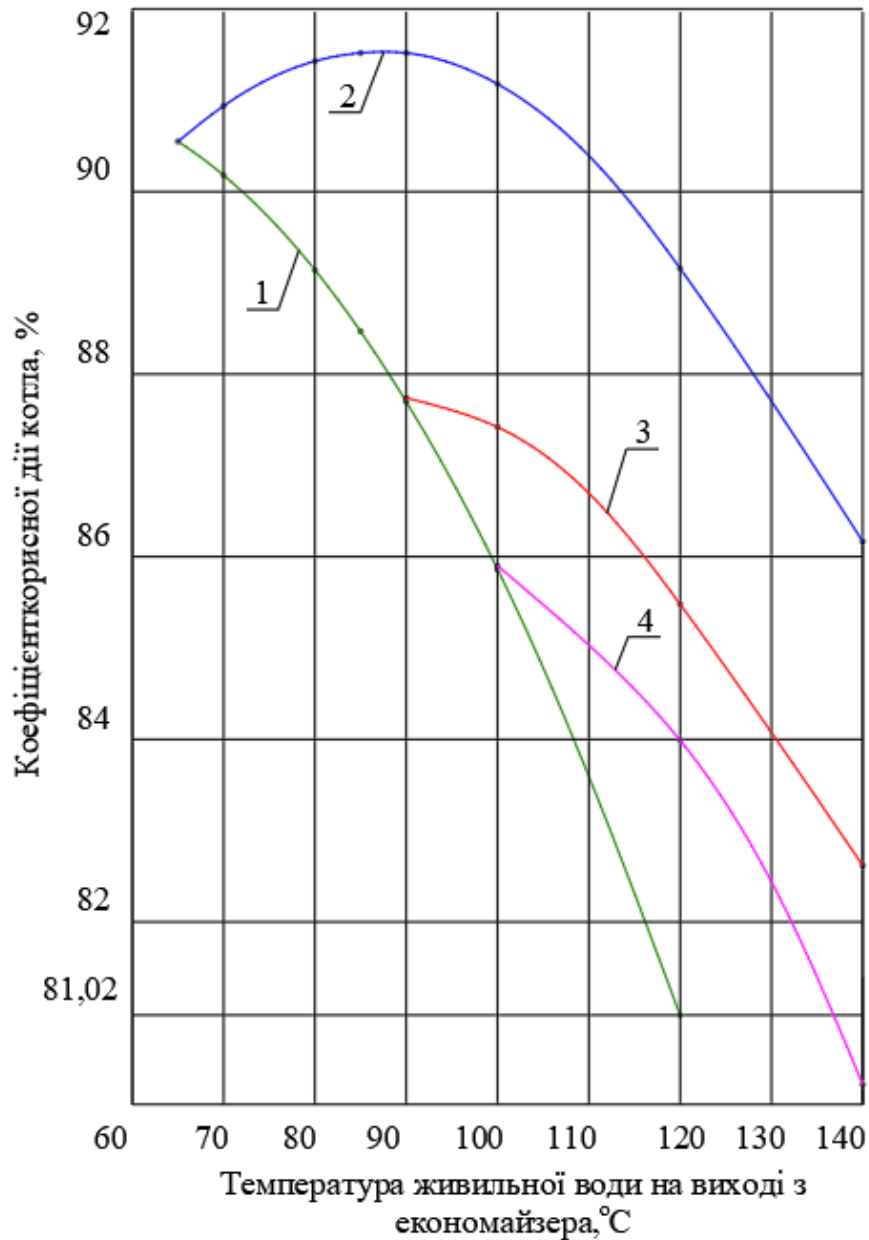


Рис. 3. Зміна сумарного КПД для жаротрубного котла, обладнаного не киплячим економайзером, в залежності від температури живильної води на вході в економайзер: 1 – ккд неконденсаційного жаротрубного котла без економайзера (адаптовано з рис. 1.); 2 – ккд неконденсаційного жаротрубного котла з економайзером, температура живильної води на вході в економайзер 65 °C; 3 – ккд неконденсаційного жаротрубного котла з економайзером, температура живильної води на вході в економайзер 90 °C; 4 – ккд неконденсаційного жаротрубного котла з економайзером, температура живильної води на вході в економайзер 100 °C

Таблиця 1. Результати розрахунку ефективності для котла з економайзером

	V_p , нм ³ /год	$t_{ж.в.}$, °C	η^L , % (апроксимоване з рис.1.)	q_2 , %	$I_{д.з.}$, кДж/нм ³	$Q_{ж.в.}$, кВт	$\Delta\eta$, %	$I_{д.з.}^{вих}$, кДж/нм ³	$t_{д.з.}$, °C	η_{tot} , %
Температура живильної води на вході в економайзер 65 °C										
1	11,66	65	90,59	9,27	3959	0	0,00	3959	213,2	90,59
2	11,61	70	90,22	9,64	4107	1	0,76	3804	205,6	90,98
3	11,55	80	89,18	10,68	4522	3	2,29	3609	196,0	91,47
4	11,54	85	88,51	11,35	4789	4	3,05	3570	194,1	91,56
5	11,54	90	87,74	12,12	5097	5	3,82	3573	194,2	91,56
6	11,58	100	85,90	13,96	5832	7	5,32	3706	200,8	91,22
7	11,85	120	81,02	18,84	7781	11	8,18	4515	240,7	89,20
8	12,40	140	74,54	25,32	10368	15	10,65	6115	319,6	85,19
Температура живильної води на вході в економайзер 90 °C										
9	11,54	90	87,74	12,12	5097	0	0,00	5097	269,4	87,74
10	11,58	100	85,90	13,96	5832	2	1,52	5225	275,7	87,42
11	11,85	120	81,02	18,84	7781	6	4,46	5999	313,9	85,48
12	12,40	140	74,54	25,32	10368	10	7,10	7533	389,5	81,64
Температура живильної води на вході в економайзер 100 °C										
14	11,58	100	85,90	13,96	5832	0	0,00	5832	305,6	85,90
15	11,85	120	81,02	18,84	7781	4	2,97	6593	343,2	83,99
16	12,40	140	74,54	25,32	10368	8	5,68	8100	417,5	80,22

Висновки. Жаротрубні котли з вуглецевої сталі з не киплячими економайзерами забезпечують підвищену паливну ефективність за умови дотримання експлуатаційних параметрів котла. Зокрема, для отримання максимального теплового ефекту необхідно дотримуватися таких умов. Температура живильної води після деаератора перед входом в економайзер повинна бути знижена з 105 °C до 65 °C. Більш глибоке охолодження живильної води після деаератора призводить до конденсації водяної пари, що міститься в складі димових газах, на сталевих поверхнях нагрівання економайзера і, як наслідок, до їх руйнування в результаті корозії. Охолодження живильної води до температури вище 65 °C призводить до зниження паливної ефективності котлів (рис. 3 – криві 2, 3). Живильна вода на виході з економайзера повинна підігріватися до температури в діапазоні 65...105 °C. Максимальний ККД відповідає температурі живильної води на виході з економайзера 85-90 °C. Підігрівання живильної води до температури понад 105 °C є недоцільним, оскільки приріст складової теплового балансу котла q_2 перевищує приріст $\Delta\eta$, що призводить до зниження ККД котла. Підігрів живильної води до температури менше 65 °C забезпечує роботу котла в конденсаційному режимі, що є небажаним для поверхні нагрівання котла з вуглецевої сталі через корозійні процеси.

References

1. "Wind of change – making intelligent use of waste heat", SAACKE GMBH, 2013.
2. "Boiler Economizer Systems." Cain Industries, USA, 2006.
3. "High Efficiency Condensing Economizers", AIC, 2010.
4. "Use Feedwater Economizers for Waste Heat Recovery." U.S. Department of Energy, 2012.
5. "Use of Non-Condensing Economizer on a Boiler." Southern California Gas Company, 2012.
6. Asthana A. K. "Biomass as fuel in small boilers." Asian Productivity Organization, 2009. http://www.apo-tokyo.org/00e-books/GP-17_Biomass.htm
7. Myrovsky A., Grzegorz L., Ellen I. "Materials for the design of modern boilers and heating systems". EkoInform, 2005.
8. M. Raisch. "Full utilization of the heat of combustion", LOOS International, 2007.

UDC 697.54

PhD, Assoc. Prof., **Bogdan Fediai**,
fed_bn@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6323-7185,
Scientific and Technical Enterprise ALMAGROUP LLC

DETERMINATION OF THE OPTIMUM FEED WATER TEMPERATURE AT THE INLET TO THE FIRE-TUBE STEAM BOILER EQUIPPED WITH A NON-BOILING ECONOMIZER

Abstract. *In the heat balance of fire-tube steam boiler units, the losses of thermal energy with waste combustion products are the largest. The installation of non-boiling economizers for the purpose of utilizing the heat energy of flue gases in industrial boilers based on fire-tube boiler units is a common practice. At the same time, insufficient attention is paid to the analysis of the temperature regime of feed water at the economizer outlet, before it is fed into the fire-tube boiler, and its influence on the boiler unit efficiency. The article investigates the change in the efficiency of medium-capacity fire-tube steam boiler units depending on the feedwater temperature when using non-boiling economizers. Carbon steel fire-tube boilers with non-boiling economisers provide increased fuel efficiency, if the boiler operating parameters are considered. In particular, the following conditions must be met to achieve maximum thermal efficiency. The temperature of the feed water after the deaerator before entering the economiser should be reduced from 105 °C to 65 °C. Deeper cooling of the feed water after the deaerator leads to condensation of water*

vapour contained in the flue gases on the steel heating surfaces of the economiser and, as a result, to their destruction due to corrosion. Cooling the feed water to a temperature above 65 °C leads to a decrease in the fuel efficiency of boilers (Fig. 3 - curves 2, 3). The feed water at the outlet of the economiser should be heated to a temperature in the range of 65...105 °C. The maximum efficiency corresponds to the feed water outlet temperature of 85-90 °C. Heating the feed water to a temperature above 105 °C is impractical, since the increase in the boiler heat balance component q_2 exceeds the increase in $\Delta\eta$, which leads to a decrease in boiler efficiency. Heating the feed water to a temperature of less than 65 °C ensures the boiler operation in the condensation mode, which is undesirable for the heating surface of a carbon steel boiler due to corrosion processes.

Keywords: economizer, feed water, steam boiler, heat recovery unit, flue gases, thermal efficiency.