

ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.20535/kpi-sn.2020.1.197948

УДК 620.9:697.32

М.Ф. Боженко*, О.В. Озеруга

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*corresponding author: bojenko41@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРІВ ДИМОВИХ ГАЗІВ ВОДОГРІЙНИХ КОТЕЛЕНЬ

Проблематика. Опалювальні водогрійні котельні, які спалюють природний газ для вироблення теплоти у вигляді гарячої води, потребують зменшення обсягів його споживання за рахунок зниження температури відхідних димових газів котлів і, відповідно, збільшення ККД. Але чи не найбільшою проблемою наразі залишається проблема захисту довкілля, одним із напрямів вирішення якої є зменшення викидів оксиду азоту з димовими газами в газових котельнях.

Мета дослідження. Підвищення енергетичної ефективності опалювальних водогрійних котелень помірно-централізованого і централізованого теплопостачання за рахунок зменшення температури відхідних газів і корисного використання в цьому процесі теплоти в теплоутилізаторах для власних потреб котельні або для потреб зовнішніх споживачів, а також оптимізація режимів роботи поверхневих утилізаторів при зволоженні дуттьового повітря, що використовується для зменшення викидів оксидів азоту.

Методика реалізації. Розрахунково-числовим методом виконано аналіз впливу на енергетичну й екологічну ефективність поверхневих утилізаторів температури та вологовмісту зволожуваного повітря, що подається на пальники котлів.

Результати дослідження. Отримано залежності коефіцієнта байпасування, питомої кількості відведеної в калориферах теплоти та її приросту від кінцевої температури охолодження димових газів, а також значення викидів оксидів азоту в довкілля у разі зволоження дуттьового повітря з температурами 50 і 60 °С за різних початкових температур димових газів у інтервалі 140–190 °С.

Висновки. Показано, що з точки зору практичної реалізації в котельнях більш доцільним є зволоження повітря за температури 50 °С, при цьому його вологовміст сягатиме 85 г/кг с.п., а димових газів на вході в утилізатор – 190 г/кг с.г., оптимальна температура газів на виході з калорифера – 27–32 °С, коефіцієнт байпасування – 0,26–0,33, питома кількість відведеної в калориферах теплоти порівняно з режимом без зволоження повітря може бути збільшена на 28 %, а викиди оксидів азоту з димовими газами в довкілля можуть бути зменшені більш як у 3 рази.

Ключові слова: котельня; димові гази; температура; теплоутилізатор; калорифер; кількість теплоти; коефіцієнт байпасування; енергетична ефективність; екологічна ефективність.

Вступ

Відомо, що в багатьох діючих котельнях систем централізованого та помірно-централізованого теплопостачання в експлуатації перебувають водогрійні котли типу КВ-ГМ, ТВГ тощо, температура димових газів на виході з яких при спалюванні газу t'_r коливається від 140 до 190 °С, а ККД – від 90,5 до 92,5 %. Зниження t'_r сприятиме підвищенню ККД котла і котельні в цілому.

Для утилізації теплоти димових газів у котельнях використовуються поверхневі та контактні теплоутилізатори, а також теплоутилізатори на теплових трубах і теплонасосні установки.

Теплоутилізатори будь-якого типу встановлюються за котлами, в яких спалюється природний газ, і можуть бути використані для нагріву сирої та хімічно підготовленої води для власних

потреб котелень, а також води, що подається на гаряче водопостачання (ГВП) споживачів (при централізованому приготуванні води ГВП у котельнях), та води для низькотемпературних систем опалення, обігріву теплиць тощо.

Конструкції основних теплоутилізаційних установок, схемні рішення стосовно їх розміщення в газовому та водяному трактах котелень, методики розрахунків та вибору викладені в працях І.З. Аронова, Л.Г. Семенюка, А.А. Кудінова, Н.М. Фіалко й інших авторів.

Для глибокого охолодження продуктів згоряння нижче температури точки роси вельми енергоефективними є конденсаційні контактні утилізатори [1], але з іншого боку, як показав попередній аналіз, капіталовкладення і експлуатаційні витрати в них більші, ніж у поверхневих утилізаторах-калориферах.

Поверхневі теплоутилізатори зазвичай експлуатуються у так званому “сухому” режимі, коли від димових газів відводиться тільки “явна” теплота при їх постійному вологовмісті, а кінцева температура димових газів на виході з утилізатора t_r'' становить $60\text{ }^\circ\text{C}$ і є більшою за температуру точки роси t_p . Збільшення потоку відведеної від димових газів теплоти можливе при експлуатації калориферів у так званому “мокрому” режимі, коли від димових газів відводиться і “явна”, і “прихована” теплота. Практичний досвід роботи такої установки з калорифером КСК 4-11, що був установлений за паровим котлом ДЕ-10-14ГМ, упродовж двох років, описаний у праці [2].

Слід зазначити, що в разі експлуатації теплоутилізаційних установок при глибокому охолодженні димових газів необхідно запобігти конденсації в газоходах котельні та димовій трубі, тобто забезпечити температуру димових газів у них не менше $60\text{ }^\circ\text{C}$, що можна досягти такими методами [3]:

- підігріванням охолоджених димових газів у поверхневому теплообміннику, нагрівальним теплоносієм у якому може бути гаряча вода після водогрійних котлів (для водогрійних котелень) або гарячі димові гази, що відібрані перед економайзером парового котла (для котелень із паровими котлами);

- підмішуванням до відхідних газів повітря, нагрітого в повітрянагрівачі котельні (для котелень із паровими котлами);

- байпасуванням частини димових газів поза теплоутилізаторами (для котелень усіх типів).

У роботі [4] виконана оцінка енергетичної та економічної ефективності встановлення в котельні з трьома водогрійними котлами калориферних установок, які експлуатуються в “сухому” і “мокрому” режимах, а в роботі [5] – те саме і при зволоженні дуттьового повітря, яке подається в топку котла. Останні розрахунки були виконані за значення вологовмісту повітря 40 г/кг с.п. . У результаті розрахунків і порівняльного аналізу отримано, що максимальний потік відведеної теплоти в калориферних установках відповідає температурам димових газів на виході, які зменшуються від $28\text{ }^\circ\text{C}$ (при $t_r' = 140\text{ }^\circ\text{C}$) до $23\text{ }^\circ\text{C}$ (при $t_r' = 190\text{ }^\circ\text{C}$). Мінімальний коефіцієнт байпасування при охолодженні димових газів до температур $23\text{--}28\text{ }^\circ\text{C}$ становить $0,25\text{--}0,33$. Максимальний приріст теплового потоку

відповідає температурам охолоджених димових газів $23\text{--}28\text{ }^\circ\text{C}$ і становить близько 10% . Окрім того, надходження в топку котла додаткової кількості водяної пари з дуттьовим повітрям сприяє зниженню температури в ядрі факела і зменшенню викидів NO_x із димовими газами [6], тобто за вологовмісту повітря 40 г/кг с.п. викиди оксидів азоту зменшилися приблизно у 2 рази.

Постановка задачі

Стаття присвячена питанню подальшого підвищення енергетичної та екологічної ефективності котелень при збільшенні температури і вологовмісту зволоженного повітря, а також виявленню оптимальних значень цих параметрів.

Енергетична ефективність утилізаторів

Одним із основних параметрів, що характеризує енергетичну ефективність утилізатора, є можлива питома величина кількості відведеної від димових газів теплоти, кДж/кг с.г. , яка визначається за відомим рівнянням теплового балансу

$$q_{к.г} = (h_r' - h_r''),$$

де h_r' та h_r'' – ентальпія димових газів на вході в утилізатор та виході з нього відповідно, кДж/кг .

Збільшити потік відведеної в утилізаторі теплоти $q_{к.г}$ можливо за рахунок підвищення ентальпії димових газів на вході h_r' або зменшення ентальпії на виході h_r'' .

Для визначення ентальпії димових газів використовується залежність

$$h_{ri} = c_{с.г} t_{ri} + (2500 + 1,97 t_{ri}) d_{ri}, \quad (1)$$

де $c_{с.г}$ – теплоємність, $\text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, t_{ri} – температура, $^\circ\text{C}$, d_{ri} – вологовміст, кг/кг с.г. , димових газів.

Аналіз формули (1) показує, що величина ентальпії димових газів на вході в теплоутилізатор h_r' зв'язана з її температурою t_r' та вологовмістом d_r' на виході з котла.

Оскільки температура t_r' є фіксованою для котла кожного типу, то очевидно, що підвищення ентальпії h_r' можливе за рахунок збільшення вологовмісту d_r' , величина якого, кг/кг с.г. , розраховується за формулою

$$d_r' = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}}}{G_r^c}, \quad (2)$$

де V_{H_2O} – дійсний об’єм водяної пари в димових газах, m^3/m^3 ; ρ_{H_2O} – густина водяної пари в димових газах за нормальних умов, kg/m^3 ; G_{Γ}^c – маса сухих димових газів, kg/m^3 .

Дійсний об’єм водяної пари в димових газах, m^3/m^3 , становить

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + [1,6\alpha_{\text{відх}}(d_{\text{п}} - 0,01) + 0,0161(\alpha_{\text{відх}} - 1)]V_{\text{пов}}^0, \quad (3)$$

де $V_{H_2O}^0$ – теоретичний об’єм водяної пари в димових газах, віднесений до $1 m^3$ палива, m^3/m^3 ; $\alpha_{\text{відх}}$ – коефіцієнт надлишку повітря в димових газах за котлом; $d_{\text{п}}$ – вологовміст повітря, kg/kg с.п.; $V_{\text{пов}}^0$ – теоретичний об’єм повітря для спалювання $1 m^3$ природного газу, m^3/m^3 .

Збільшення величини $d_{\text{п}}$ можливе за рахунок зволоження дуттьового повітря, наприклад, у насадкових камерах.

На рис. 1 наведена схема утилізації теплоти димових газів котельні зі зволоженням дуттьового повітря.

Опис схеми утилізації

Димові гази з котла 1 надходять у міжтрубний простір теплоутилізатора-калорифера 2, де охолоджуються і осушуються та спрямовуються в димову трубу. Для запобігання конденсації водяних парів у газовому тракті та димовій трубі

частина димових газів, що визначається коефіцієнтом байпасування θ_{Γ} , надходить на підмішування до охолоджених димових газів.

У трубках калориферної установки циркулює вода, яка нагрівається і частково надходить на контактний повітрянагрівач та частково – до зовнішніх споживачів, після яких знову спрямовується до калориферної установки.

На контактний повітрянагрівач 3 надходить зовнішнє повітря, яке при безпосередньому контакті з водою на насадці, наприклад із кілець Рашига, нагрівається і зволожується та спрямовується на газові пальники котлів. Для запобігання випадінню вологи зі зволоженого повітря, відносна вологість якого сягає 95–100 %, до нього підмішується повітря з верхньої зони котельні, що характеризується коефіцієнтом байпасування $\theta_{\text{п}}$.

Розрахунковий аналіз системи утилізації

У методиці виконання числових розрахунків задавали температуру повітря $t_{\text{п}}$ і визначали його вологовміст, kg/kg с.п.:

$$d_{\text{п}} = 0,622 \frac{\varphi p_s}{p_6 - \varphi p_s},$$

де φ – відносна вологість повітря, яку брали за 1 (100 %) з урахуванням того, що в контактних апаратах воно практично досягає повного насичення; p_s – тиск насичення водяної пари для заданої температури повітря, Па; p_6 – барометрич-

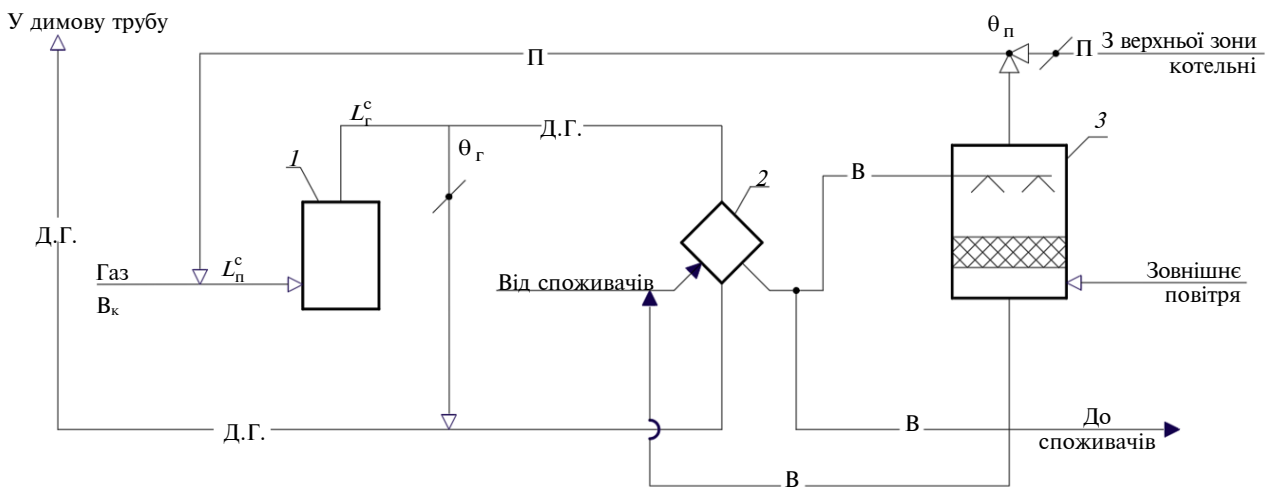


Рис. 1. Схема утилізації теплоти димових газів: 1 – водогрійний котел; 2 – теплоутилізатор-калорифер; 3 – контактний повітрянагрівач; П – повітря; Д.Г. – димові гази; В – вода

ний тиск, Па (в розрахунках брали 101325 Па для нормальних умов).

Для виключення випадіння вологи в пальниках зволожено повітря підсушували повітрям із верхньої зони котельні з температурою $t_{в.з} = 30$ °С і відносною вологістю $\varphi_{в.з} = 30$ % та визначали вологовміст повітряної суміші, що надходить у топку котла, кг/кг с.п.:

$$d_{см} = d_{п} - \theta_{п} (d_{п} - d_{в.з}), \quad (4)$$

де $\theta_{п}$ – коефіцієнт байпасування повітря поза контактною камерою (в розрахунках брали величину $\theta_{п} = 0,2$); $d_{п}$, $d_{в.з}$ – вологовміст зволоженого повітря та повітря з верхньої зони котельні відповідно, кг/кг с.п.

За формулою (3) визначали дійсний об'єм водяної пари в димових газах, $\text{м}^3/\text{м}^3$, у якій замість $d_{п}$ підставляли величину $d_{см}$, а інші величини брали такими: $\alpha_{відх} = 1,15$; $V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 2,12 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $V_{\text{пов}}^0 = 9,59 \text{ м}^3/\text{м}^3$ (для усередненого складу природного газу).

За формулою (2) визначали вологовміст димових газів на виході з котла – вході в теплоутилізатор, d'_r , кг/кг с.г., при цьому брали густину водяної пари за нормальних умов $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0,804 \text{ кг}/\text{м}^3$, а $G_r^c = 13,42 \text{ кг}/\text{м}^3$ (за прикладом розрахунків роботи [4]).

Температуру точки роси димових газів, °С, визначали за рекомендаціями праці [7]:

$$t_p = 37,11 \text{ г} [1000 d'_r / (3,77 + 0,085 \alpha_{відх})],$$

а температуру суміші димових газів перед димососом, °С, – за виразом

$$t_r^{см} = t_p + 5.$$

У результаті розв'язання рівняння теплового балансу для точки суміші отримали вираз для коефіцієнта байпасування димових газів поза утилізатором:

$$\theta_r = \frac{t_r^{см} - t_r''}{t_r' - t_r''},$$

де t_r' і t_r'' – температура димових газів на виході з котла – вході в теплоутилізатор та на виході з теплоутилізатора відповідно, °С.

За рекомендаціями праці [8] визначали вологовміст димових газів на виході з теплоутилізатора, кг/кг с.г.:

$$d_r'' = \frac{0,6382 + 4\alpha_{відх}}{1000(0,199 + \alpha_{відх})} e^{0,062 t_r''}.$$

Ентальпії димових газів h'_r і h''_r , кДж/кг, розраховували за формулою (1) за теплоємності $c_{с.г} = 1$ кДж/(кг·К) та відповідних значень температури і вологовмісту.

Питому кількість утилізованої теплоти димових газів у теплоутилізаторах-калориферах, кДж/(кг с.г.), визначали за формулою

$$q_{к.г} = (1 - \theta_r)(h'_r - h''_r).$$

За наведеною вище методикою виконано числові розрахунки залежностей коефіцієнтів байпасування θ_r та питомої кількості утилізованої теплоти димових газів $q_{к.г}$ у калориферних установках при зволоженні дуттьового повітря від кінцевої температури охолоджених димових газів t_r'' за різних температур димових газів на виході з котлів – вході в калориферні установки t_r' .

Розрахунки проведені за двох значень температури зволоженого повітря:

1) $t_{п} = 50$ °С, при цьому отриманий за формулою (4) вологовміст суміші повітря, що подається на газові пальники, становить $d_{см} = 85$ г/кг с.п.; а вологовміст димових газів на виході з котла – на вході в теплоутилізатори – $d'_r = 190$ г/кг с.г.

2) $t_{п} = 60$ °С, при цьому вологовміст суміші повітря, що подається на газові пальники, становить $d_{см} = 190$ г/кг с.п.; а вологовміст димових газів на виході з котла – на вході в теплоутилізатори – $d'_r = 250$ г/кг с.г. Таке максимальне значення вологовмісту димових газів на вході в утилізатори було досягнуто автором роботи [9] при дослідженні комплексних теплоутилізаційних систем із підвищенням вологовмісту відхідних димових газів.

Результати числових розрахунків наведені на рис. 2, з якого видно, що коефіцієнт байпасування при зменшенні кінцевої температури охолоджених димових газів збільшується, а для “сухого” режиму роботи калориферів (до температури охолодження димових газів $t_r'' = t_p + 5$, яка для $t_{п} = 50$ °С становить 68 °С і для $t_{п} = 60$ °С – 72 °С) дорівнюватиме нулю. Зі зменшенням початкової температури димових газів після котлів абсолютні значення цього параметра підвищуються.

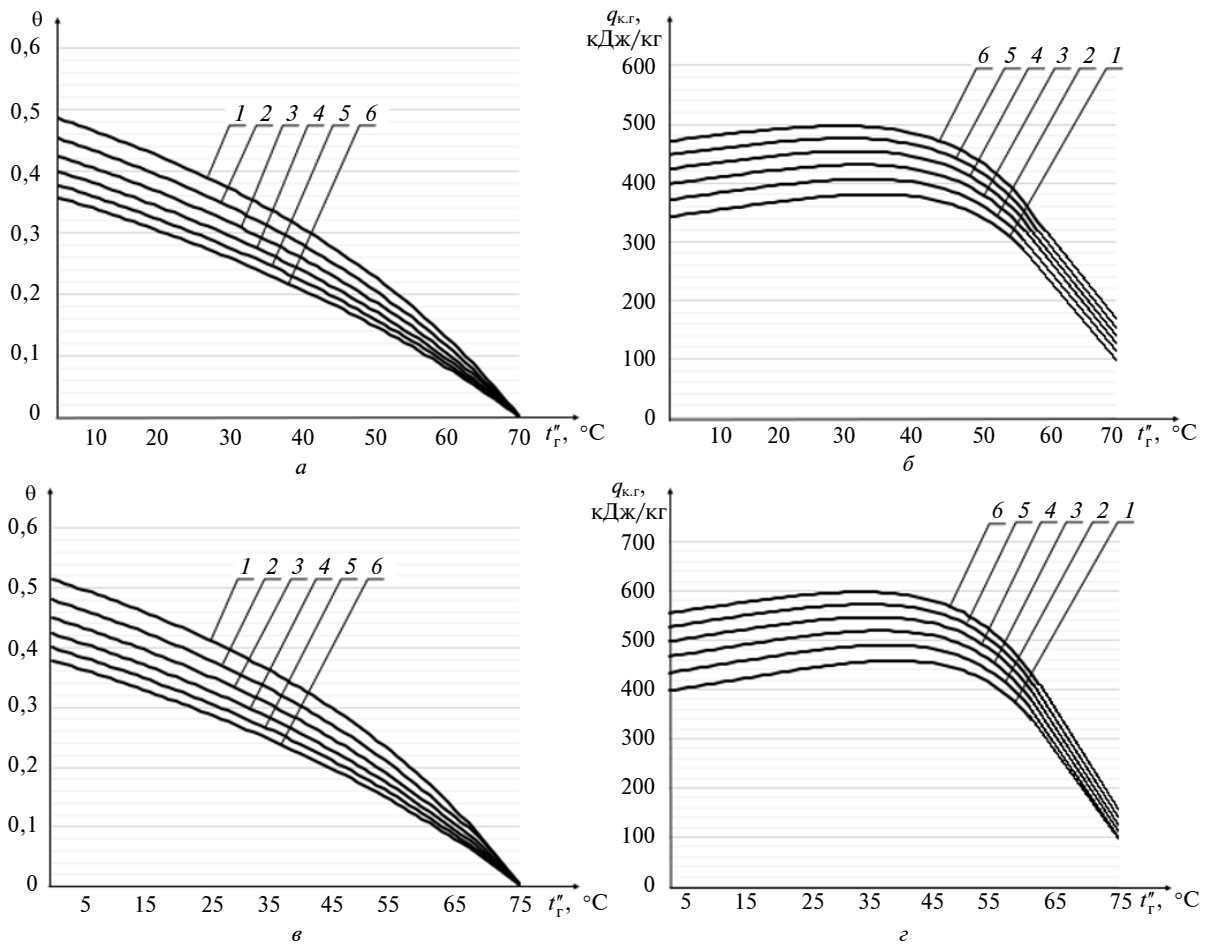


Рис. 2. Залежності коефіцієнта байпасування θ (а, в) та питомої кількості відведеної теплоти $q_{k.g.}$, кДж/кг с.г., (б, г) при $t_n = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ (а, б) і $t_n = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ (в, г) від кінцевої температури охолоджених газів t_g'' за температур димових газів на вході в калорифери t_g' , $^\circ\text{C}$: 1 – 140; 2 – 150; 3 – 160; 4 – 170; 5 – 180; 6 – 190

Питома кількість відведеної в калориферних установках теплоти збільшується зі зменшенням температури охолодження, а для кожної із залежностей за різних початкових температур спостерігаються максимуми.

Результати оптимізаційних розрахунків показників теплоутилізаторів при глибокому охолодженні димових газів і зволоженні дуттьового повітря для температур 50 і 60 $^\circ\text{C}$ наведені в таблиці.

До таких показників відносяться значення мінімальних температур димових газів t_g'' і оптимального коефіцієнта байпасування θ за вихідних температур димових газів t_g' , які відповідають максимальній питомій кількості відведеної теплоти в калориферних установках.

У таблиці також наведені максимальні значення питомої кількості відведеної в калори-

ферних установках теплоти при глибокому охолодженні димових газів без зволоження дуттьового повітря за даними роботи [4], а також приріст питомої кількості відведеної теплоти при зволоженні повітря, який за $t_n = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ становив приблизно 28 %, а за $t_n = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ – приблизно 54 %. У роботі [5], де розрахунки проводилися при $t_n = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, приріст потоків відведеної теплоти порівняно з варіантом без зволоження дорівнював 10 %.

Екологічна ефективність утилізаторів

Вище зазначено, що надходження в топку котла додаткової кількості водяної пари з дуттьовим повітрям сприяє зниженню температури в ядрі факела і зменшенню викидів NO_x із димовими газами.

Таблиця. Оптимальні параметри теплоутилізаторів при зволоженні повітря

$t'_r, ^\circ\text{C}$	Без зволоження $\frac{q_{k.g.}, \text{кДж}}{\text{кг с.г.}}$	$t_n = 50 ^\circ\text{C}$					$t_n = 60 ^\circ\text{C}$				
		Оптимальні параметри при зволоженні			Приріст $\Delta q_{k.g.}$ при зволоженні		Оптимальні параметри при зволоженні			Приріст $\Delta q_{k.g.}$ при зволоженні	
		$t''_r, ^\circ\text{C}$	θ_r	$\frac{q_{k.g., \text{max}}, \text{кДж}}{\text{кг с.г.}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг с.г.}}$	%	$t''_r, ^\circ\text{C}$	θ_r	$\frac{q_{k.g., \text{max}}, \text{кДж}}{\text{кг с.г.}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг с.г.}}$	%
140	298	32	0,33	380	82	28	36	0,35	458	160	54
150	318	30	0,32	406	88	28	35	0,32	490	172	54
160	337	28	0,30	431	94	28	34	0,31	519	182	54
170	355	28	0,29	454	99	28	32	0,29	547	192	54
180	373	27	0,27	476	103	28	31	0,27	573	200	54
190	390	27	0,26	497	107	27	31	0,26	597	207	53

Величину зменшення викидів оксидів азоту з димовими газами визначають залежно від кількості надлишкової водяної пари, яка надходить із дуттьовим повітрям, що припадає на 1 кг спалюваного природного газу, кг/кг газу:

$$W_x = 16,79\alpha_T d_{cm}(1 - \theta_n), \quad (5)$$

де α_T – коефіцієнт надлишку повітря в топці котла.

Беремо $\alpha_T = 1,05$; за раніше виконаними розрахунками $\theta_n = 0,2$; тоді за визначеного вологовмісту суміші повітря $d_{cm} = 0,085$ кг/кг с.п. (для $t_n = 50 ^\circ\text{C}$) згідно з формулою (5) величина $W_x = 1,2$ кг/кг газу, а для $t_n = 60 ^\circ\text{C}$ за вологовмісту суміші повітря $d_{cm} = 0,15$ кг/кг с.п. величина $W_x = 2,12$ кг/кг газу.

Викидання оксидів азоту в атмосферу (в перерахунку на його діоксид), г/с, при спалюванні природного газу в разі зволоження дуттьового повітря обчислюється за формулою

$$M'_{NO_x} = M_{NO_x} e^{-1,11W_x}, \quad (6)$$

де M_{NO_x} – викидання оксидів азоту в атмосферу при спалюванні природного газу без зволоження дуттьового повітря, г/с.

За результатами розрахунків (наприклад, виконаних у роботі [5]) для водогрійної котельні з трьома котлами КВ-ГМ-20 при спалюванні природного газу величина $M_{NO_x} = 1$ г/с.

Тоді згідно з формулою (6) величина $M'_{NO_x} = 0,26$ г/с (для $t_n = 50 ^\circ\text{C}$) і $M'_{NO_x} = 0,1$ г/с (для

$t_n = 60 ^\circ\text{C}$). Таким чином, при зволоженні повітря ($t_n = 50 ^\circ\text{C}$) викидання оксидів азоту в атмосферу може бути зменшено більш як у 3 рази, а за $t_n = 60 ^\circ\text{C}$ – приблизно в 10 разів.

Висновки

Розроблено методику розрахунків енергетичної ефективності теплоутилізаційної установки з поверхневими утилізаторами-калориферами, що використовується для глибокого охолодження димових газів котельні при зволоженні дуттьового повітря.

Отримано залежності коефіцієнта байпасування та питомої кількості відведеної в калориферах теплоти від кінцевої температури охолодження димових газів при зволоженні дуттьового повітря з температурами 50 і 60 $^\circ\text{C}$ для різних початкових температур в інтервалі 140–190 $^\circ\text{C}$.

При зволоженні повітря з температурою $t_n = 50 ^\circ\text{C}$ максимальний потік відведеної в калориферах теплоти досягається за температури газів на виході $t''_r = 27$ –32 $^\circ\text{C}$, коефіцієнта байпасування $\theta_{\text{опт}} = 0,26$ –0,33, а приріст питомої кількості відведеної теплоти $\Delta q_{k.g.}$ порівняно з роботою калориферів без зволоження повітря становить 28 %. За температури зволоженого повітря $t_n = 60 ^\circ\text{C}$ оптимальні показники становлять: $t''_r = 31$ –36 $^\circ\text{C}$; $\theta_{\text{опт}} = 0,26$ –0,35; $\Delta q_{k.g.} = 54$ %.

З точки зору практичної реалізації в котельнях без порушення технологічного режиму спалювання природного газу, очевидно, більш

доцільним є зволоження повітря за температури $t_n = 50\text{ }^\circ\text{C}$, при цьому його вологовміст сягатиме 85 г/кг с.п. , вологовміст димових газів на вході в утилізатор – 190 г/кг с.г.

Подальші дослідження будуть спрямовані на виявлення найбільш ефективних схем утилізації через їх порівняння за зведеними витратами.

References

- [1] I.S. Aronov, *Water Contact Heating by Combustion Products of Natural Gas*, 2nd ed. Leningrad, SU: Nedra, 1990, 280 p.
- [2] A.A. Kudinov, “Improving the efficiency of the surface type condensing heat exchanger”, *Promenergetika*, no. 1, pp. 30–34, 1999.
- [3] N.M. Fialko *et al.*, “The study of modes of boiler flues under the conditions of deep cooling of flue gases”, *Promteplotekhnika*, vol. 25, no. 4, pp. 27–31, 2003.
- [4] M.F. Bozhenko and I.Y. Perevertkina, “Cascade utilization of flue gas heat from hot water boilers”, *Energy: Economics, Technology, Ecology*, no. 1, pp. 81–88, 2016.
- [5] M.F. Bozhenko and I.Y. Perevertkina, “Improving the efficiency of waste heat exchangers for flue gases from boiler houses by moistening the blowing air”, *Energy: Economics, Technology, Ecology*, no. 1, pp. 51–57, 2017.
- [6] A.A. Kudinov, *Energy Saving at Heat-Generating Plants*. Ulyanovsk, Russia: UIGPU, 2000, 139 p.
- [7] P.P. Bezlydnyi *et al.*, “Determination of the dew point temperature of the combustion products of natural gas”, *Izvestiya Vuzov. Energetika*, no. 12, pp. 89–90, 1986.
- [8] L.G. Semenyuk, “Obtaining the condensate under deep cooling of combustion products”, *Promenergetika*, no. 8, pp. 47–50, 1987.
- [9] M.A. Nowakowski, “The combined heat utilizing systems for boilers of low and medium power with the high content of moisture in the flue gases”, PhD dissertation, Elect. and Electron. Eng., ITTF NAN Ukraine, Kyiv, Ukraine, 2017.

М.Ф. Боженко, О.В. Озерура

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРОВ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЕЛЬНЫХ

Проблематика. В отопительных водогрейных котельных, в которых сжигается природный газ для производства теплоты в виде горячей воды, необходимо уменьшать объемы его потребления за счет снижения температуры отходящих дымовых газов котлов и, соответственно, увеличения КПД. Но более важной проблемой в настоящее время остается проблема защиты окружающей среды, одним из направлений решения которой является уменьшение выбросов оксидов азота с дымовыми газами в газовых котельных.

Цель исследования. Повышение энергетической эффективности отопительных котельных умеренно-централизованного и централизованного теплоснабжения за счет уменьшения температуры отходящих дымовых газов и полезного использования в этом процессе теплоты в теплоутилизаторах для собственных нужд котельной или для нужд внешних потребителей, а также оптимизация режимов работы поверхностных утилизаторов при увлажнении дутьевого воздуха, который применяется для уменьшения выбросов оксидов азота.

Методика реализации. Расчетно-численным методом выполнен анализ влияния на энергетическую и экологическую эффективность поверхностных утилизаторов температуры и влагосодержания увлажняемого воздуха, который подается в топку котлов.

Результаты исследования. Получены зависимости коэффициента байпасирования, удельного количества отведенной в калориферах теплоты и ее прироста от конечной температуры охлаждения дымовых газов, а также значения выбросов оксидов азота в окружающую среду при увлажнении дутьевого воздуха с температурами $50\text{ }^\circ\text{C}$ и $60\text{ }^\circ\text{C}$ при различных начальных температурах дымовых газов в интервале $140\text{--}190\text{ }^\circ\text{C}$.

Выводы. Показано, что с точки зрения практической реализации в котельных более приоритетным является увлажнение воздуха при температуре $50\text{ }^\circ\text{C}$, при этом его влагосодержание составляет 85 г/кг с.в. , а дымовых газов на входе в утилизатор – 190 г/кг с.г. , оптимальная температура газов на выходе из калорифера – $27\text{--}32\text{ }^\circ\text{C}$, коэффициент байпасирования – $0,26\text{--}0,33$, удельное количество отведенной в калориферах теплоты по сравнению с режимом без увлажнения может быть увеличено на 28% , а выбросы оксидов азота с дымовыми газами в окружающую среду могут быть уменьшены более чем в 3 раза.

Ключевые слова: котельная; дымовые газы; температура; теплоутилизатор; калорифер; количество теплоты; коэффициент байпасирования; энергетическая эффективность; экологическая эффективность.

M.F. Bozhenko, O.V. Ozeruga

ENHANCING THE ENERGY AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF SURFACE HEAT EXCHANGERS OF SMOKE GASES OF WATER BOILER HOUSES

Background. In water-heating boiler houses, where natural gas is burned to produce heat in the form of hot water, it is necessary to reduce its consumption by reducing the temperature of the wasting flue gases from the boilers and, accordingly, increasing their efficiency. But nowadays, a more important problem is the problem of environmental protection, one of the directions of its solution is the reduction of emissions of nitrogen oxides with flue gases in gas boiler houses.

Objective. The purpose of the paper is to improve the energy efficiency of moderate-centralized and centralized heating boiler houses by reducing the temperature of the exhaust flue gases and the beneficial use of heat in heat exchangers for own needs of the boiler houses or external consumers, and optimize the operating modes of the surface heat exchangers for humidification of blast air, used for reducing nitrogen oxide emissions.

Methods. The analysis of the influence of surface utilizers of the temperature and moisture content of humidified air fed into the boiler furnaces on the energetic and environmental efficiency was made by using the numerical calculation method.

Results. The dependences of the bypass coefficient, the specific amount of the heat removed from the heaters and its increment from the final flue gas cooling temperature, as well as the emissions of nitrogen oxides into the environment when humidifying blast air with temperatures of 50 and 60 °C, at various initial flue gas temperatures in the range of 140–190 °C were obtained.

Conclusions. It is shown that, from the point of view of practical implementation in boiler houses, air humidification at the temperature of 50 °C is the main priority, while its moisture content is 85 g/kg d.a., and the flue gas at the inlet to the utilizer is 190 g/kg d.g. the optimum temperature of the gases leaving the air heater is 27–32 °C, the bypass coefficient is 0.26–0.33, the specific amount of the heat removed from the heaters compared to the non-humidified mode can be increased by 28%, and the emissions of nitrogen oxides with flue gases into the environment can be reduced by more than 3 times.

Keywords: boiler house; flue gases; temperature; heat exchanger; air heater; amount of heat; bypass coefficient; energy efficiency; environmental efficiency.

Рекомендована Радою
теплоенергетичного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
02 жовтня 2019 року

Прийнята до публікації
04 лютого 2020 року