



встановлення за ними утилізаторів теплоти при роботі на природному газі, що дозволить збільшити ККД, а також корисно використати утилізовану теплоту для нагрівання води різного призначення.

Утилізатори теплоти можуть бути поверхневими та контактними і експлуатуватися в так званому «сухому» або «мокрому» режимах. В першому з них від димових газів відводиться тільки «явний» потік теплоти, а в другому – окрім «явного», ще й «прихований».

В роботі [2] з посиланнями на відповідні літературні джерела описані типи поверхневих та контактних теплоутилізаторів, які використовуються для нагрівання води власних потреб котельні та інших можливих споживачів. Калорифери типу КсК зі спіральним оребренням розглядалися як поверхневі утилізатори, а серед контактних виділені конструкції контактних теплоутилізаторів з активною насадкою (КТАНів-утилізаторів та КТАНів-повітрянагрівачів) розробки Латдіпропрома та екологічно чистої теплоутилізаційної установки (ЕКТ) розробки Інституту енергозбереження НАН України.

Також конструкції зазначених вище і інших теплоутилізаційних установок, схемні рішення стосовно їх розташування в газовому та водяному трактах котельні, методики розрахунків та вибору викладені в роботах Аронова І.З., Семенюка Л.Г., Фіалко Н.М., і інших авторів.

Серед сучасних підходів до глибокої утилізації теплоти димових газів можна виділити роботи [3–5], де запропоновані комплексні теплоутилізаційні установки з підігріванням та зволоженням дуттьового повітря і нагрівання води різних потреб (зворотньої з теплових мереж, хімічно очищеної, технологічних споживачів, гарячого водопостачання).

При глибокому охолодженні димових газів важливим фактором експлуатації теплоутилізаційних установок є виключення конденсації водяних парів в газовому тракті і димовій трубі, тобто потрібно забезпечити температуру димових газів в цих елементах не менше за 60°C. Уникнути конденсації утворенню можна наступними способами [6]:

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

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

- байпасуванням частини димових газів поза теплоутилізаторами (для котельні всіх типів).

В роботі [7] наведені результати дослідження тепловологісних режимів експлуатації залізобетонних, цегляних та металевих димових труб комунальних котельні при застосуванні сучасних теплоутилізаційних технологій з тепловими методами захисту газовідхідних трактів. Автори обґрунтували використання для запобігання конденсації утворення в димових трубах різного типу таких методів як байпасування частини димових газів повз утилізатор, підсушування цих газів у газопідігрівачах і зовнішня теплоізоляція труб.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Найпоширенішими теплоутилізаційними установками, які доведені до промислового виробництва, а також практичного використання в котельних та на ТЕЦ, є поверхневі утилізатори-калорифери, КТАНі, ЕКТ. Дослідження порівняльної ефективності поверхневих калориферів та КТАНів для утилізації теплоти димових газів пароводогрійних котельні показало, що з економічної точки зору за мінімальною величиною зведених витрат найефективнішими є поверхневі утилізатори-калорифери [8]. В роботі [9] виконані порівняльні розрахунки енергетичної і екологічної ефективності теплоутилізаційних установок з КТАНОм-утилізатором – КТАНОм-повітрянагрівачем, з ЕКТ, з поверхневими утилізаторами-калориферами, при глибокому охолодженні димових газів і зволоженні дуттьового повітря. Розрахунки виконані для теплоутилізаційних установок, встановлених в опалювальній водогрійній котельні за водогрійним котлом КВ-ГМ-10. Було показано, що теплоутилізаційна установка з поверхневими калориферами характеризується найвищими показниками енергетичної і екологічної ефективності.

В роботах [10–12] наведені результати розрахункових досліджень енергетичної і екологічної ефективності використання поверхневих калориферів для утилізації теплоти димових газів водогрійних котельні. Дослідження проводилися при роботі калориферів в «сухому» і «мокрому» режимах, у тому числі і при нагріванні та зволоженні дуттьового повітря. У всіх розрахункових схемах для запобігання конденсації водяних парів в газовому тракті і в димовій трубі обрано метод байпасування частини димових газів в обхід калориферів, оскільки він потребує мінімальних капіталовкладень порівняно з іншими наведеними в роботах [6, 7]. В результаті числових розрахунків були отримані окремі залежності коефіцієнта байпасування (для «мокрого» режиму) і питомих

потоків або кількості відведеної теплоти від температури охолоджених димових газів для різних температур димових газів на вході в калорифери в інтервалі 140–190°C. Слід також зазначити, що можливі потоки відведеної від димових газів теплоти та необхідні для нагрівання води різного призначення, а також її вхідних і вихідних температур, не завжди співпадають.

**Метою статті** є отримання узагальнених залежностей коефіцієнта байпасування та питомої кількості відведеної від димових газів теплоти у залежності від температури охолоджених димових газів та їх температури на вході в калорифери. Отримані залежності можуть бути використані в режимі реального часу для визначення можливої максимальної кількості відведеної теплоти, або для регулювання теплопродуктивності утилізаторів у залежності від необхідного потоку теплоти для нагрівання води зовнішніх споживачів.

**Виклад основного матеріалу.** Питому кількість відведеної від димових газів теплоти в утилізаторі при будь-якому режимі його роботи, кДж/кг с.г, можна визначити за відомим рівнянням теплового балансу

$$q_{\text{к.г}} = (1 - \theta_r)(h'_3 - h''_3), \quad (1)$$

де  $\theta_r$  – коефіцієнт байпасування димових газів;  $h'_3$  та  $h''_3$  – ентальпія димових газів на вході в утилізатор та виході з нього, відповідно, кДж/кг.

Коефіцієнт байпасування підбирається таким, щоби температура димових газів (або їх суміші) перед димососом  $t_r^{\text{см}}$  приблизно на 5°C перевищувала температуру точки роси  $t_p$  вхідних газів.

Температуру точки роси димових газів, °C, визначали за формулою

$$t_p = 37,11 \text{ g} [1000d'_r / (3,77 + 0,085\alpha_{\text{відх}})], \quad (2)$$

де  $\alpha_{\text{відх}}$  – коефіцієнт надлишку повітря у відхідних димових газах.

В результаті вирішення рівняння теплового балансу суміші отримали вираз для коефіцієнта байпасування димових газів поза утилізатором, який виикористовували і в роботах [10–12]

$$\theta_r = \frac{t_r^{\text{см}} - t_r''}{t_r' - t_r''}, \quad (3)$$

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

З урахуванням теплоємностей сухої частини димових газів  $c_{\text{с.г}} = 1$  кДж/кг та водяної пари в них  $c_{\text{п}} = 1,97$  кДж/кг для визначення ентальпії димових газів використовували залежність

$$h_{3i} = t_{3i} + (2500 + 1,97t_{3i})d_{Ti},$$

де  $d_{Ti}$  – вологовміст димових газів, кг/кг с.г.

«Сухий» режим роботи утилізаторів. В цьому режимі охолодження димових газів в утилізаторі відбувається при постійному вологовмісті, тобто  $d'_r = d''_r$ . Коефіцієнт байпасування  $\theta_r = 0$ , а температура охолоджених димових газів  $t_r'' = 60^\circ\text{C}$ . З урахуванням відповідних перетворень рівняння (1) для «сухого» режиму набуде наступного вигляду

$$q_{\text{к.г}} = t'_r + 1,97d'_r(t'_r - 60) - 60. \quad (4)$$

В розрахунках  $q_{\text{к.г}}$  за формулою (4) змінювали температуру димових газів  $t'_r$  від 140 до 200°C з інтервалом в 10°C, причому для кожної з них також змінювали і вологовміст  $d'_r$  від 0,1 до 0,15 кг/кг с.г з інтервалом в 0,01 кг/кг с.г.

Оскільки встановити безпосередню залежність  $q_{\text{к.г}} = f(t'_r)$  не вдалося, тому була визначена умовна питома кількість утилізованої теплоти  $q'_{\text{к.г}}$  з урахуванням вологовмісту, що обчислюється за виразом  $q'_{\text{к.г}} = q_{\text{к.г}}(1 - d'_r)^{1,4}$  і яка у залежності від  $t'_r$  наведена на рис. 1.

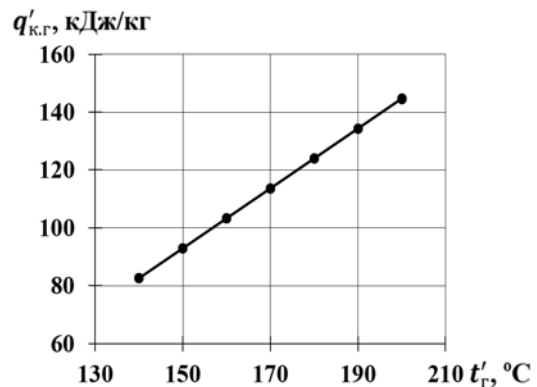


Рис. 1. Залежність  $q'_{\text{к.г}}$  від  $t'_r$  для «сухого» режиму роботи утилізаторів

В результаті апроксимації розрахункових даних була отримана залежність для визначення умовної питомої кількості теплоти при охолодженні димових газів в «сухому» режимі

$$q'_{\text{к.г}} = 1,0331t'_r - 61,986. \quad (5)$$

Максимальне відхилення розрахункових значень  $q'_{\text{к.г}}$  від апроксимальної залежності у всьому діапазоні температур не перевищувало 0,12 %.

Для практичного використання отриманих результатів спочатку для заданої температури  $t'_r$  за рис. 1 або за залежністю (5) необхідно визначити величину  $q'_{\text{к.г}}$ , а потім з урахуванням відомого вологовмісту  $d'_r$  – питомої кількості утилізованої теплоти, кДж/кг, за формулою

$$q_{\text{к.г}} = \frac{q'_{\text{к.г}}}{(1 - d'_r)^{1,4}}.$$

**Режим глибокого охолодження димових газів.** Спочатку за формулою (2) визначили тем-

пературу точки роси вхідних димових газів  $t_p$  при зміні вологовмісту  $d'_r$  від 0,1 до 0,15 г/кг с.г, яка змінюється від 52,5 до 59°C. В подальших розрахунках брали максимальне значення цієї величини, тоді температура суміші, що входить в формулу (3) для  $\theta_r$  становитиме  $t_r^{см} = 65^\circ\text{C}$ .

Надалі визначали величини  $\theta_r$  у залежності від  $t_r''$ , змінюючи її від 5 до 50°C з інтервалом у 5°C. Для кожної з температур  $t_r''$  розрахунки виконували для різних значень вхідних температур димових газів  $t_r'$  від 140 до 200°C з інтервалом 10°C.

Оскільки встановити безпосередню залежність  $\theta_r = f(t_r'')$  не вдалося, тому був визначений умовний коефіцієнт байпасування  $\theta'_r$  з урахуванням вхідної температури димових газів, що обчислюється за виразом  $\theta'_r = (1 - \theta_r) / (t_r' + 273)$  і який у залежності від  $t_r''$  наведений на рис. 2.

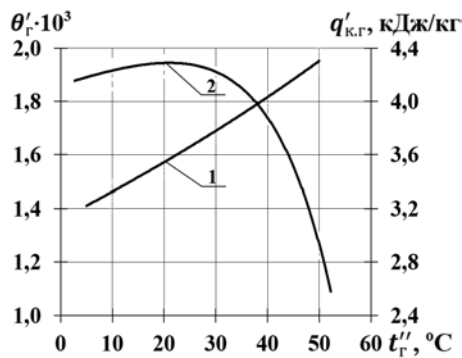


Рис. 2. Залежність  $\theta'_r$  (1) і  $q'_{к.г}$  (2) від  $t_r''$  при глибокому охолодженні димових газів

В результаті апроксимації розрахункових даних була отримана залежність для визначення умовного коефіцієнта байпасування при глибокому охолодженні димових газів

$$(\theta'_r \cdot 10^3) = 1,3611e^{0,0072t_r''} \quad (6)$$

Максимальне відхилення розрахункових значень  $\theta'_r$  від апроксимальної залежності складає 4,9 % для  $t_r'' = 5^\circ\text{C}$  при  $t_r' = 140^\circ\text{C}$ , для інших комбінацій температур коливається в межах (1,8–3,6) %.

Для практичного розрахунку умовного коефіцієнта байпасування за рис. 2 або за рівнянням (6) для будь-якої температури  $t_r''$  визначається величина  $\theta'_r$ , потім при заданій температурі  $t_r'$  обчислюється коефіцієнт байпасування

$$\theta_r = 1 - \theta'_r / (t_r' + 273) \quad (7)$$

Питома кількість утилізованої теплоти, кДж/кг с.г, при глибокому охолодженні димових газів також визначається за рівнянням (1), яке з урахуванням залежностей ентальпій  $h'_3$  та  $h''_3$  від температур та вологовмістів і відповідних перетворень набуде наступного вигляду

$$q_{3,3} = (1 - \theta_r) [(t_r' - t_r'') + 2500(d_r' - d_r'') + 1,97(d_r' t_r' - d_r'' t_r'')] \quad (8)$$

Розрахунки виконували при  $d_r' = 0,13$  кг/кг с.г, а для вологовмісту  $d_r''$ , формула для визначення якого наведена в роботі [10], при  $\alpha_{вдх} = 1,15$  отримали залежність

$$d_r'' = 0,003883 e^{0,062t_r''} \quad (9)$$

Надалі змінюючи температури  $t_r''$  при різних значеннях  $t_r'$  обчислювали значення  $q_{к.г}$ , а потім визначили умовну питому кількість утилізованої теплоти за виразом

$$q'_{к.г} = \frac{q_{к.г}}{(t_r'')^{0,85}} \quad (9)$$

В результаті апроксимації розрахункових даних  $q'_{к.г}$  від  $t_r''$  (див. рис. 2) була отримана залежність для визначенні умовної кількості відведеної від димових газів теплоти при глибокому охолодженні димових газів

$$q'_{к.г} = 4,12 + 0,013 t_r'' - 2,36 \cdot 10^{-4} (t_r'')^2 + 8,74 \cdot 10^{-6} (t_r'')^3 - 5,73 \cdot 10^{-7} (t_r'')^4 + 9,65 \cdot 10^{-9} (t_r'')^5 - 1,14 \cdot 10^{-10} (t_r'')^6 \quad (10)$$

Максимальне відхилення розрахункових значень  $q'_{к.г}$  від апроксимальної залежності складає 4,0 % для  $t_r'' = 5^\circ\text{C}$  при  $t_r' = 140^\circ\text{C}$ , для інших комбінацій температур коливається в межах (0,6–2,8) %.

Для практичного використання отриманих результатів спочатку для заданої температури  $t_r''$  за рис. 2 або за залежністю (10) необхідно визначити величину  $q'_{к.г}$ , а потім з урахуванням відомої температури  $t_r'$  – питому кількість утилізованої теплоти, кДж/кг, за формулою

$$q_{к.г} = q'_{к.г} (t_r'')^{0,85} \quad (11)$$

Режим глибокого охолодження димових газів зі зволоженням дуттьового повітря.

Спочатку за формулою (2) визначили температуру точки роси димових газів, яка при  $\alpha_{вдх} = 1,15$  та вологовмісту димових газів на вході в теплоутилізатор при зволоженні дуттьового повітря  $d_r' = 0,19$  кг/кг с.г [12] становила  $t_p = 63^\circ\text{C}$ . Тоді температура суміші перед димососом, що входить до формули (3) для визначення коефіцієнта байпасування, дорівнює  $t_r^{см} = 68^\circ\text{C}$ .

Аналогічно розрахункам для режиму глибокого охолодження без зволоження дуттьового повітря визначали  $\theta_r$  та  $\theta'_r$ . Залежність останнього від  $t_r''$  наведена на рис. 3. В результаті апроксимації розрахункових даних була отримана залежність для визначенні умовного коефіцієнта байпасування при глибокому охолодженні димових газів зі зволоженням дуттьового повітря

$$(\theta'_r \cdot 10^3) = 1,3207e^{0,0072t_r''} \quad (12)$$



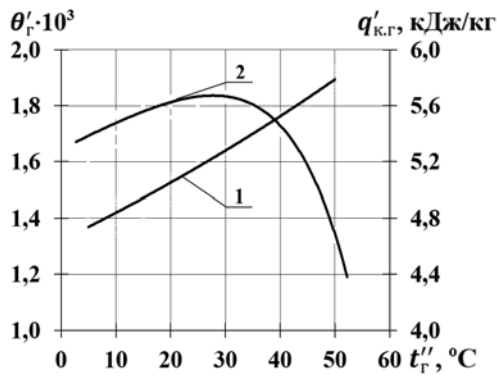


Рис. 3. Залежність  $\theta'_r$  (1) і  $q'_{к.г}$  (2) від  $t''_r$  при глибокому охолодженні димових газів зі зволоженням дуттьового повітря

Максимальне відхилення розрахункових значень  $\theta'_r$  від апроксимальної залежності складає 6,0 % для  $t''_r = 5^\circ\text{C}$  при  $t'_r = 140^\circ\text{C}$ , для інших комбінацій температур коливається в межах (1,9–4,3) %.

Для практичного розрахунку умовного коефіцієнта байпасування за рис. 3 або за рівнянням (12) для будь-якої температури  $t''_r$  визначається величина  $\theta'_r$ , а потім при заданій температурі  $t'_r$  за формулою (7) – коефіцієнт байпасування  $\theta_r$ .

Також за аналогією з попереднім розрахунком режиму без зволоження дуттьового повітря після визначення  $q'_{к.г}$  за формулою (9) обчислювали величини  $q'_{к.г}$ , а в результаті апроксимації розрахункових даних цього параметра від  $t''_r$  (див. рис. 3) була отримана залежність для визначення умовної кількості відведеної від димових газів теплоти при глибокому охолодженні димових газів зі зволоженням дуттьового повітря

$$q'_{к.г} = 5,29 + 0,0202 t''_r - 1,82 \cdot 10^{-4} (t''_r)^2 + 8,72 \cdot 10^{-6} (t''_r)^3 - 5,52 \cdot 10^{-7} (t''_r)^4 + 9,34 \cdot 10^{-9} (t''_r)^5 - 1,10 \cdot 10^{-10} (t''_r)^6. \quad (13)$$

Максимальне відхилення розрахункових значень  $q'_{к.г}$  від апроксимальної залежності складає 3,8 % для  $t''_r = 5^\circ\text{C}$  при  $t'_r = 140^\circ\text{C}$ , для інших комбінацій температур коливається в межах (0,5–1,7) %.

Для практичного використання отриманих результатів спочатку для заданої температури  $t''_r$  за рис. 3 або за залежністю (13) необхідно визначити величину  $q'_{к.г}$ , а потім з урахуванням відомої температури  $t'_r$  – питому кількість утилізованої теплоти, кДж/кг, за формулою (11).

**Висновки.** 1. В роботі проведений аналіз розрахункових досліджень енергетичної і екологічної ефективності використання поверхневих калориферів для утилізації теплоти димових газів при їх роботі в «сухому» і «мокрому» режимах, у тому числі і зі зволоженням дуттьового повітря.

2. В результаті числових розрахунків отримані узагальнені залежності коефіцієнта байпасування та питомої кількості відведеної від димових газів теплоти у залежності від температури охолоджених димових газів та їх температури на вході в поверхневі утилізатори-калорифери, а також різних значень вологовмісту димових газів. Зазначені залежності отримані для трьох режимів роботи утилізаторів: «сухого», при глибокому охолодженні димових газів, при глибокому охолодженні димових газів зі зволоженням дуттьового повітря.

3. Отримані залежності можуть бути використані в режимі реального часу для визначення можливої максимальної кількості відведеної теплоти, або для регулювання теплопродуктивності утилізаторів у залежності від необхідного потоку теплоти для нагрівання води зовнішніх споживачів.

4. Напрямок подальших досліджень може бути розробка технологічних регламентів експлуатації теплоутилізаційних установок різного типу у залежності від необхідних теплових навантажень споживачів нагрітої води.

### Список літератури:

1. Сігал І. Я., Лавренцов Є. М., Сміхула А. В., Марасін О. В., Домбровська Е. П. Енергоефективне обладнання для модернізації газових котлів потужністю 0,1 – 30 МВт. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. № 4. 2021. С. 27–35.
2. Боженко М. Ф., Сало В. П. Енергозбереження в теплопостачанні : навч. посіб. К. : НТУУ «КПІ». 2008. 268 с.
3. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Гнедаш Г. О., Глушак О. Ю. Зменшення вологовмісту димових газів у конденсаційних теплоутилізаторах котельних установок. *Науковий вісник НЛТУ України*. Т. 29. № 8. 2019. С. 116–119. <https://doi.org/10.36930/40290821>.
4. Фіалко Н. М., Пресіч Г. О., Гнедаш Г. О., Навродська Р. О., Новаківський М. О. Технологія утилізації теплоти димових газів з підвищеним вологовмістом для газоспоживальних котлів комунальної енергетики. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. № 45 (1321). 2018. С. 70–77. doi:10.20998/82413-4295.2018.45.09.
5. Новаківський М. О. Комплексні теплоутилізаційні системи для котлів малої та середньої потужності з підвищеним вологовмістом відхідних газів. автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.06 / ІТТФ НАН України. Київ, 2017. 21 с.

6. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Пресіч Г. О. Дослідження режимів роботи димових труб котелень за умов глибокого охолодження димових газів *Промислова теплотехніка*. Т. 25. № 4. 2003. С. 27–31.
7. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Пресіч Г. О. Аналіз ефективності системи захисту газовідвідних трактів котельних установок при застосуванні теплоутилізаційних технологій. *Промислова теплотехніка*. Т. 38. № 1. 2016. С. 47–53. DOI:10.31472/ihe.1.2016.06.
8. Коржевін А. Д., Боженко М. Ф. Комплексна утилізація теплоти в пароводогрійній котельні системи централізованого теплопостачання. Матеріали XI Міжнародної науково – практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів. Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. 16-19 квітня 2013 р. Київ: НТУУ «КПІ». Т. 1. С. 137.
9. Боженко М. Ф., Озеруга О. В. Порівняльні характеристики утилізаційних установок димових газів котелень зі зволоженням дуттьового повітря. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. № 1. 2020. С. 79–89. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2020.217572>.
10. Боженко М. Ф., Перевьорткіна І. Я. Каскадна утилізація теплоти димових газів опалювальних водогрійних котелень. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. № 1 (43). 2016. С. 81–88.
11. Боженко М. Ф., Перевьорткіна І. Я. Підвищення ефективності утилізаторів теплоти димових газів котелень за рахунок зволоження дуттьового повітря. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. № 1 (47). 2017. С. 51–57.
12. Боженко М. Ф., Озеруга О. В. Підвищення енергетичної та екологічної ефективності поверхневих теплоутилізаторів димових газів водогрійних котелень. *KPI Science News*. № 1. 2020. С. 7–14. DOI: 10.20535/kpi-sn.2020.1.197948.

#### **Bozhenko M.F., Kamyshnyi B.M. METHODOLOGY FOR DETERMINING THE ENERGY EFFICIENCY OF FLUE GAS HEAT UTILIZATION IN BOILER PLANTS**

*The article is dedicated to the development of energy-saving measures in boiler plants of centralized and moderately centralized heating systems, namely – the utilization of heat from flue gases of water-heating and steam boilers when burning natural gas. Surface or contact type heat recovery units can be operated in “dry” or “wet” modes. In the first mode, only the “explicit” heat flow is removed from the flue gases, and their cooling occurs at a constant moisture content to a temperature that is approximately 5°C higher than the dew point temperature. In the “wet” mode, deep cooling of the flue gases occurs to temperatures lower than the dew point temperature, with both “explicit” and “latent” heat flows being removed. Increasing the efficiency of heat exchangers with deep cooling of flue gases is also possible with the humidification of combustion air. The heat recovered in heat recovery units can be effectively used for heating water for the internal needs of the boiler plants (raw or chemically treated), hot water supply to consumers, return water of the heating networks, etc. An analysis of the comparative efficiency of surface and contact heat exchangers, carried out at the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, showed that from an economic point of view, heat exchangers-radiators are the most efficient in terms of minimal total costs. The study provides a generalization of previous research on the energy efficiency of surface radiators installed with water-heating boilers operating in “dry” and “wet” modes, including with air humidification. As a result of numerical calculations, generalized dependencies of the bypass coefficient and the specific amount of heat removed on the temperatures of the flue gases at the outlet and the temperatures and moisture content at the inlet were obtained. The calculations were carried out for three operating modes of the heat exchangers: “dry”, with deep cooling of flue gases, and with deep cooling of flue gases with air humidification. The obtained dependencies can be used in real-time mode to determine the maximum possible amount of heat removed, or to regulate the heat productivity of the heat exchangers depending on the required heat flow for heating water for external consumers.*

**Key words:** boiler, flue gases, temperature, heat exchanger, heat quantity, bypass coefficient, water, energy efficiency.