

УДК 536.24:621.184.5

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ ПІДГРІВАННЯ ТЕПЛОМЕРЕЖНОЇ ВОДИ ТА ДУТТЬОВОГО ПОВІТРЯ КОТЛІВ КОМУНАЛЬНОЇ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ

Навродська Р.О., канд. техн. наук, Фіалко Н.М., член-кор. НАН України,
Гнедаш Г.О., канд. техн. наук, Сбродова Г.О., канд. фіз.-мат. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

Обґрунтовано застосування теплоутилізаційної системи з комбінованим використанням утилізованої теплоти для котлів комунальної теплоенергетики.

Визначено теплові характеристики системи та рівні підвищення ККД котла при раціональному співвідношенні площ поверхонь теплообміну водо- та повітрогрійного устаткування даної системи для різних регіонів України.

Обосновано применение теплоутилизационной системы с комбинированным использованием утилизированной теплоты для котлов коммунальной теплоэнергетики.

Определены тепловые характеристики системы и уровни повышения КПД котла при рациональном соотношении площадей поверхностей теплообмена водо- и воздухогрейного оборудования данной системы для разных регионов Украины.

The application of the heat recovery system with the combined use of the recycled heat of the municipal boiler plants is substantiated.

The thermal characteristics of the system and the levels of increase in the efficiency of the boiler with a rational ratio of the areas of heat exchange surfaces of water- and air-heating equipment of this system for different regions of Ukraine are determined.

Бібл. 4, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: газоспоживальні котлоагрегати, теплоутилізація відхідних димових газів, нагрівання води та повітря, комбіновані теплоутилізаційні системи, підвищення ККД котла.

F – площа поверхні теплообміну;
 G – витрата;
 Q – теплопродуктивність;
 t, t – температура;
 W – річна теплопродуктивність;
 $\Delta\eta$ – приріст ККД котла.

Індекси:

вп – водопідігрівач;

к – конденсат;
нс – навколишнє середовище;
оп – опалювальний період;
пп – повітропідігрівач;
рац – раціональне;
мах – максимальне.

Природний газ є важливим джерелом енергії в Україні. Враховуючи світові ціни на цей вид палива і тенденцію до їхнього зростання, найактуальнішою проблемою державного рівня стає його ефективне і ощадне використання в енергетичному устаткуванні. Комунальна теплоенергетика є лідером зі споживання природного газу в Україні. Дієвим напрямом енергозбереження в цій галузі є підвищення ефективності використання палива в газоспоживальних котлоагрегатах шляхом утилізації теплоти їхніх відхідних газів [1-3]. Найвища ефективність теплоутилізації досягається при роботі утилізаційної установки з використанням прихованої теплоти конденсації водяної пари, що міститься у димових газах [4]. При найбільш поширеному використанні утилізованої теплоти тільки для нагрівання зворотної води системи тепlopостачання конденсаційний режим у даній установці спостерігається нетривалий період, зазвичай в осінньо-весняну пору року, коли навантаження котла є невеликим. Для забезпечення цього режи-

му впродовж усього опалювального сезону доцільним є комбіноване використання утилізованої теплоти для нагрівання тепломережної води та більш холодного теплоносія. Це реалізується, зокрема, шляхом створення комбінованих теплоутилізаційних систем, в яких після водогрійного теплоутилізатора встановлюється ще один теплообмінник-теплоутилізатор, призначений для нагрівання холодного повітря, що надходить на горіння.

Метою даної роботи є дослідження ефективності комбінованих теплоутилізаційних систем для підігрівання зворотної тепломережної води і дуттьового повітря для газоспоживальних комунальних котлів. Принципову схему відповідної котельної установки наведено на рис. 1.

В комбінованій теплоутилізаційній системі першим за ходом відхідних газів котла 1 є водогазовий теплообмінник 2, в якому підігрівається зворотна тепломережна вода. Після теплообмінника 2 частково охолоджені димові гази надходять до газоповітряного

теплообмінника 3, де відбувається підігрівання холодного повітря, що подається до пальників котла. В такій системі реалізується глибоке охолодження відхідних димових газів котла з конденсацією частини водяної пари, що міститься в цих газах. Для запобігання корозійного руйнування газовідвідного тракту котельної установки, внаслідок подальшого конденсаутоутворення в ньому, у схемі передбачено газопідігрівач 4, де охолоджені димові гази підсушуються шляхом підігрівання прямою водою котла. Утворений в теплоутилізаторах 2 та 3 конденсат може бути використаний корисно в котельні або відведений до каналізації через нейтралізатор конденсату, з метою дотримання норм стоків.

В роботі наведено результати розрахункових досліджень теплових і конструкційних характеристик даної теплоутилізаційної системи та проведено аналіз її ефективності. В дослідженнях в залежності від режимів роботи котла і конструкційних параметрів теплоутилізаційного устаткування визначалися такі характеристики всієї системи та окремих її елементів як: теплопродуктивність Q , обсяг утвореного конденсату G та приріст ККД котла ($\Delta\eta$). Розраховувався також річний обсяг виробництва теплової енергії W в теплоутилізаційній установці відповідно до кліматичних умов її експлуатації.

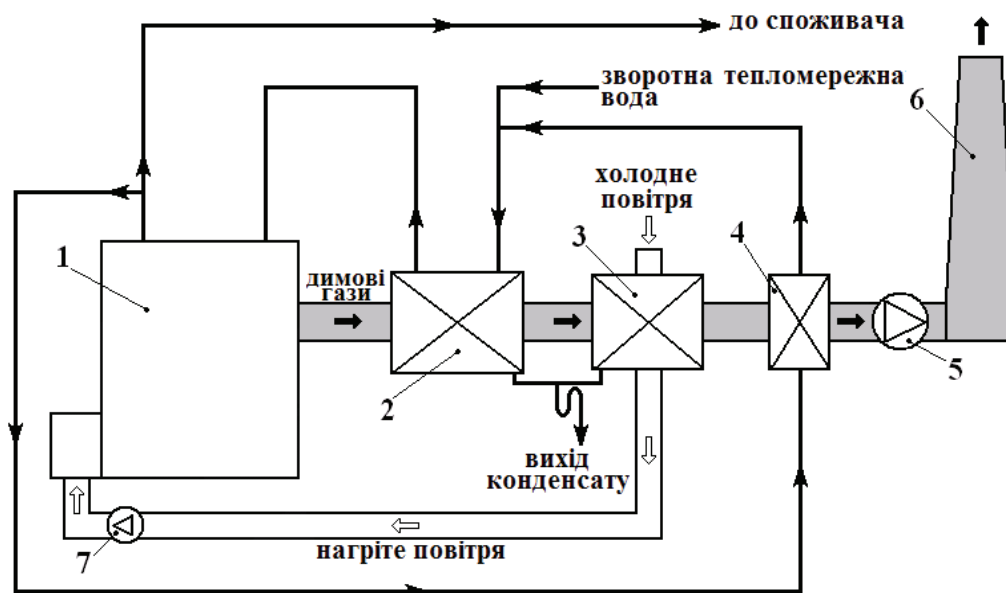


Рис. 1. Принципова схема котельної установки з сумісним використанням теплоутилізаторів для підігрівання тепломережної води та дутьового повітря:

1 – котел; 2 – водопідігрівач; 3 – повітропідігрівач; 4 – газопідігрівач; 5 – димосос; 6 – димова труба; 7 – вентилятор.

Вихідні дані для виконання розрахункових досліджень наведено у таблиці 1.

Як видно з таблиці, режимні характеристики котлів, розрахункові значення параметрів систем опалення та співвідношення площ поверхонь водо- і повітрогрійних елементів теплоутилізаційної системи $F_{\text{вп}}/F_{\text{пв}}$ змінювалося в широких межах.

На графіках рис. 2 наведено характерні результати виконаних досліджень, а саме залежності теплопродуктивності Q (а), приросту ККД котла $\Delta\eta$ (б) і обсягу утвореного конденсату G_k (в) від температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$ продовж опалювального сезону при різних співвідношеннях площ теплообміну водо- і повітрогрійного устаткування $F_{\text{вп}}/F_{\text{пв}}$.

Результати виконаних досліджень свідчать, що сумісне застосування водо- та повітрогрійних теплоутилізаторів забезпечує загальне збільшення теплопродуктивності Q , приросту ККД котла $\Delta\eta$ і

обсягу утвореного конденсату G_k протягом усього періоду опалення. За цих умов приріст ККД котла домінуючим чином визначається в осінньо-весняну пору року роботою водогрійного теплоутилізатора, а взимку – повітрогрійного. Це обумовлено реалізацією конденсаційного режиму у зимовий період (при $t_{\text{нс}} < 0^\circ\text{C}$) переважно у повітропідігрівачі за рахунок низької температури повітря навколишнього середовища, а в осінньо-весняний період (при $t_{\text{нс}} > 0^\circ\text{C}$) – у водопідігрівачі завдяки зменшенню температури зворотної тепломережної води нижче 50°C .

Особлива увага в роботі приділялась визначенню раціонального значення співвідношення площ водо- та повітрогрійного теплоутилізаторів, оскільки вплив даного показника на теплотехнічні характеристики теплоутилізаційної системи цілком достатньо вагомий. Вибір раціонального співвідношення площ базувався на визначенні максимального річного виробництва теплової енергії в комбінованій системі.

Таблиця 1. Вихідні дані для теплового і конструкційного розрахунків комбінованої теплоутилізаційної системи з водо- та повітрогрійними теплоутилізаторами

Найменування	Значення										
Параметри котла в різних режимах роботи											
Температура навколишнього середовища, °С	-20	-15	-10	-5	0	5	10				
Навантаження, %	100	87	75	62	49	36	24				
Теплопродуктивність, МВт	9,7	8,4	7,2	6,0	4,7	3,5	2,3				
Витрата відхідних газів, кг/с	5,5	4,8	4,1	3,4	2,7	2,0	1,3				
Температура газів на виході, °С	173	164	153	139	121	99	70				
Коефіцієнт надлишку повітря	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,33	1,33				
Вологовміст газів на виході, кг /кг с.г.	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,114	0,114				
Витрата води, кг/с	17,33										
Витрата повітря, кг/с	4,9	4,3	3,7	3,0	2,4	1,8	1,2				
Температура зворотної води, °С	70	65,1	60,0	54,5	48,6	42,3	35,1				
ККД без теплоутилізаторів, %	90,77	90,91	91,04	91,18	91,31	91,45	91,58				
Параметри системи опалення відповідно до кліматичних зон України											
Розрахункова температура повітря для системи опалення, °С	південний регіон				північний регіон						
	-6 ÷ -16				-16 ÷ 25						
Кількість днів опалювального періоду	126 ÷ 144				158 ÷ 192						
Перепад температур в системі, °С	95 ÷ 70										
Перепад температур теплоносія, °С	115 ÷ 70										
Параметри теплоутилізаційної установки											
Співвідношення площ водогрійного та повітрогрійного теплоутилізаторів, $F_{\text{вп}}/F_{\text{пг}}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Загальна площа водо- та повітрогрійного теплоутилізаторів, м ²	550 ÷ 600										

Як показали дослідження, значення річного обсягу виробництва теплової енергії W теплоутилізаційною установкою суттєво залежить не тільки від співвідношення площ $F_{\text{вп}}/F_{\text{пг}}$, але і від кліматичних умов експлуатації котельної установки. Проведено розрахунок величини W для 8 міст України, що відповідають різним кліматичним умовам, які визначають розрахункові параметри опалювальних систем. На рис. 3, для прикладу, наведено результати досліджень для 4 характерних міст України.

Наведені на рис. 3 результати наочно демонструють, що шукане раціональне співвідношення площ $(F_{\text{вп}}/F_{\text{пг}})^{\text{рац}}$, якому відповідає максимальне річне вироблення теплової енергії W^{max} , наприклад для Києва та Полтави становить приблизно 0,75. Це означає, що площа поверхні повітрогрійного теплоутилізатора повинна перевищувати площу водогрійного приблизно в 1,3 рази. А для Львова або Херсона, навпаки, площа поверхні водогрійного теплоутилізатора повинна бути

більшою площі повітрогрійного приблизно у 1,2 рази.

Враховуючи кліматичні особливості України, на основі аналізу отриманих значень максимального річного вироблення теплової енергії W^{max} для різних обласних міст можна зробити загальний висновок, що для території з відносно холодним кліматом, де середня температура навколишнього середовища за опалювальний період $t_{\text{он}} \leq -1,2^\circ\text{C}$, доцільним є збільшення площі поверхні теплообміну повітрогрійного устаткування, тобто $(F_{\text{вп}}/F_{\text{пг}})^{\text{рац}} \approx 0,75$, а для міст з більш теплим кліматом (при $t_{\text{он}} \approx -1,2^\circ\text{C}$) – $(F_{\text{вп}}/F_{\text{пг}})^{\text{рац}}$ повинно відповідати значенню близькому до 1,2.

В табл. 2 наведено дані щодо рівнів приросту ККД котла для різних обласних міст України при раціональних значеннях співвідношення площ теплообмінної поверхні $(F_{\text{вп}}/F_{\text{пг}})^{\text{рац}}$ водо- та повітрогрійного устаткування комбінованої теплоутилізаційної системи.

Аналіз отриманих даних показав, що при вказаних раціональних співвідношеннях площ поверхонь

$(F_{\text{вн}}/F_{\text{вн}})^{\text{рац}}$ має місце значний приріст середнього за опалювальний період ККД котла $\Delta\eta$, значення якого суттєво залежить від тривалості опалювального періоду і температур для розрахунку системи опалення.

На основі результатів проведеного комплексу досліджень в ІТТФ НАН України розроблено технічне рішення енергоефективної комбінованої теплоутилізаційної установки для нагрівання зворотної

тепломережної води та холодного дуттьового повітря. Теплообмінна поверхня водопідігрівача і газопідігрівача виконана з поперечно-оребраних біметалевих труб (сталева основа і алюмінієве оребрення), а повітропідігрівача – з гофрованих пластин із легованої сталі. Термін окупності витрат на впровадження такої комбінованої системи не перевищує 3 років.

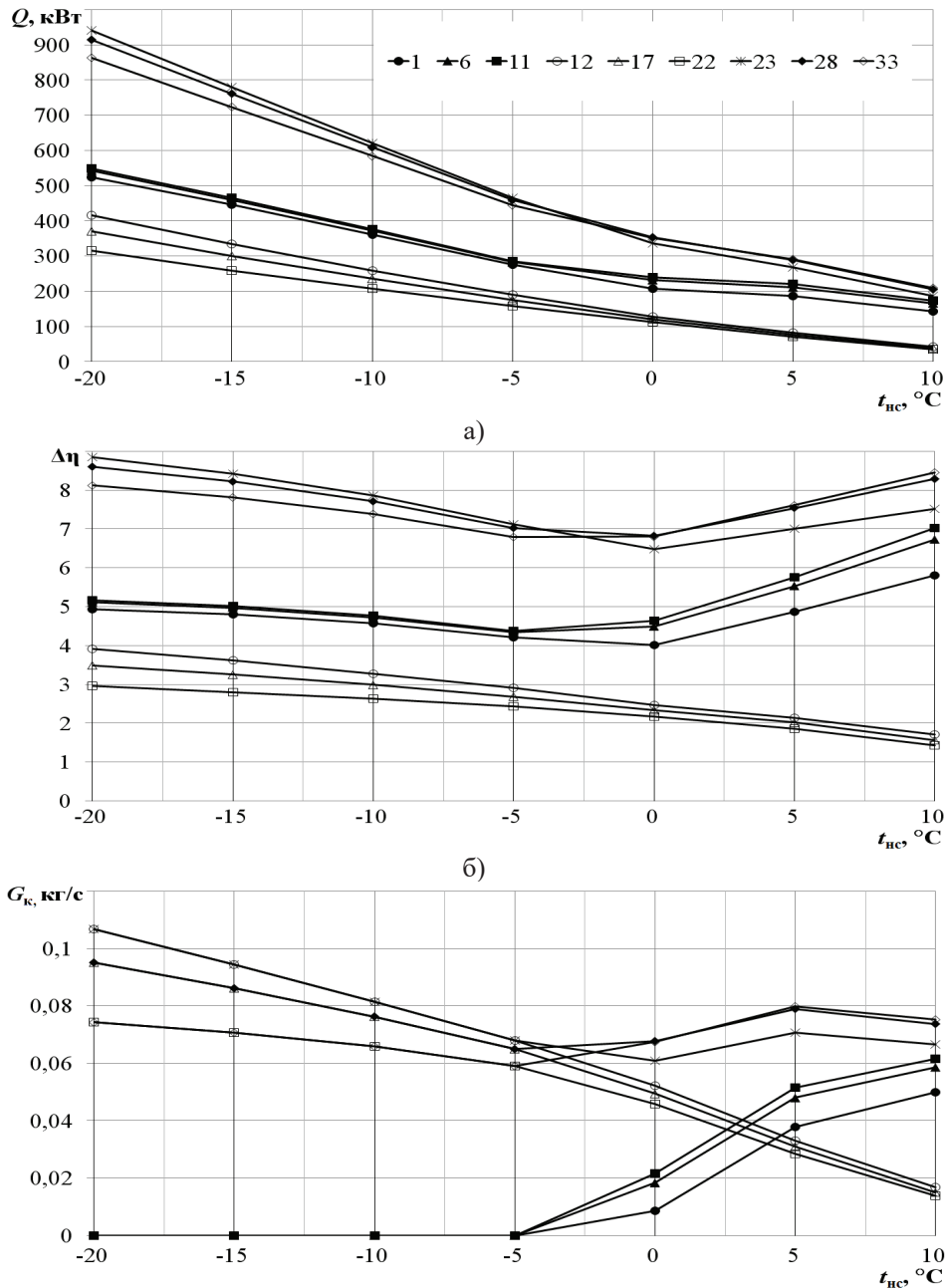


Рис. 2. Теплопродуктивність (а), приріст ККД котла (б) і витрата утвореного конденсату (в) у водопідігрівачі (1-3), повітропідігрівачі (4-6) та відповідні сумарні значення у комбінованій теплоутилізаційній установці (7-9) в залежності від температури навколишнього середовища при різних значеннях співвідношення площ водо- та повітропідігрівачів: 1, 4, 7 – $F_{\text{вн}}/F_{\text{вн}} = 0,5$; 2, 5, 8 – 1,0; 3, 6, 9 – 1,5.

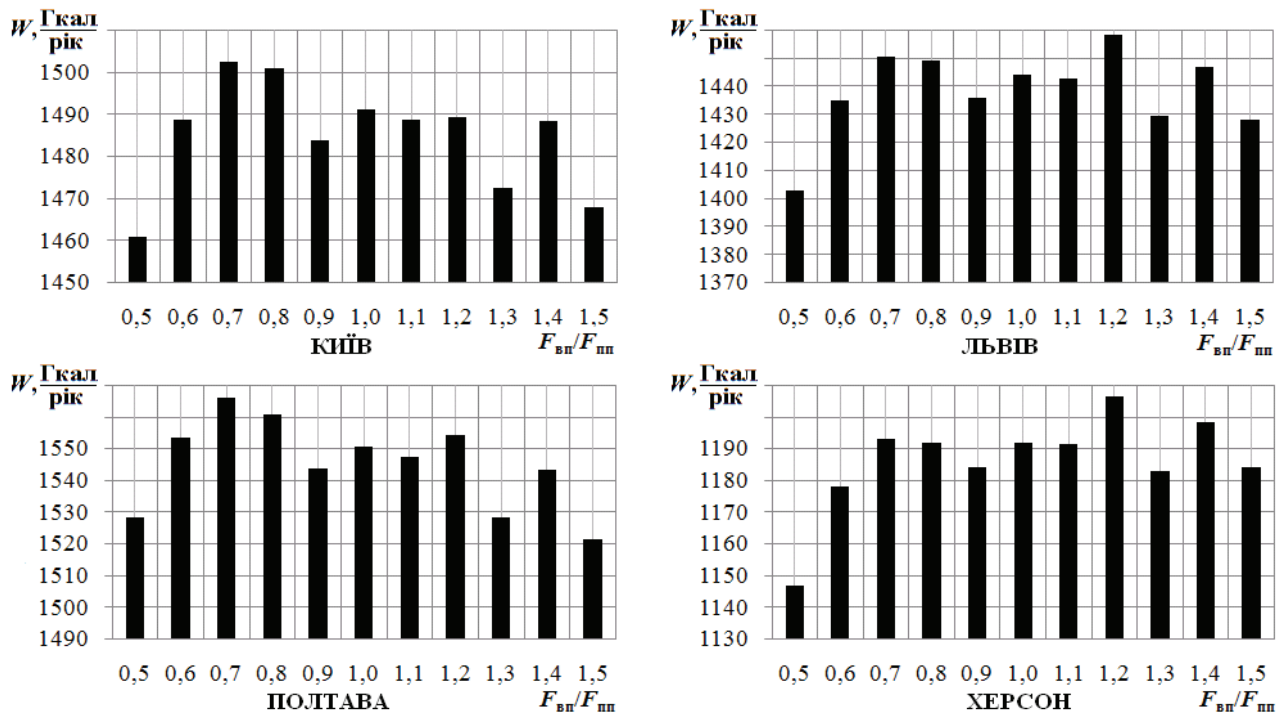


Рис. 3. Залежність річного обсягу вироблення теплової енергії W в комбінованій теплоутилізаційній установці для нагрівання зворотної тепломережної води та дуттьового повітря від співвідношення площ $F_{\text{вп}}/F_{\text{мп}}$ водо- і повітрогрійного теплоутилізаторів для різних міст України.

Таблиця 2. Характеристики комбінованої теплоутилізаційної системи з раціональним співвідношенням площ $(F_{\text{вп}}/F_{\text{мп}})_{\text{рац}}$ для міст України з різними кліматичними умовами

Параметр	Обласні міста України					
	Київ	Запоріжжя	Львів	Полтава	Суми	Херсон
Географічний регіон	північ	південь	захід	центр	схід	південь
Розрахункова температура для системи опалення, °С	-21	-23	-20	-22	-24	-18
Кількість днів опалювального періоду	187	175	191	187	195	167
Середня температура навколишнього середовища за опалювальний період $t_{\text{оп}}$	-1,2	-0,7	-0,2	-1,9	-2,5	0,6
Раціональне співвідношення площ $(F_{\text{вп}}/F_{\text{мп}})_{\text{рац}}$	0,75	1,2	1,2	0,75	0,75	1,2
Максимальний приріст ККД	9,21	9,32	8,59	9,54	10,6	8,42
Середньорічний приріст ККД	7,27	7,41	7,38	7,32	7,35	7,44

Висновки

1. Для комбінованої теплоутилізаційної системи для підігрівання зворотної тепломережної води і дуттьового повітря встановлено залежності від режиму роботи котла таких характеристик, як: теплопродуктивність, приріст ККД котла і обсяг утвореного конденсату.

2. Визначено закономірності впливу

співвідношення площ $F_{\text{вп}}/F_{\text{мп}}$ поверхонь водо- і повітрогрійного устаткування та кліматичних умов експлуатації комбінованої теплоутилізаційної установки на величину річного виробництва теплової енергії W в цій установці.

3. Показано, що раціональне значення $(F_{\text{вп}}/F_{\text{мп}})_{\text{рац}}$, яке відповідає максимальній величині річної теплопродуктивності W^{max} , суттєво залежить від

кліматичної зони. Встановлено, що $(F_{\text{вп}}/F_{\text{пп}})_{\text{рац}} \approx 1,2$ для зон експлуатації теплоутилізаційних установок з середньою температурою навколишнього середовища за опалювальний сезон $t_{\text{оп}} \approx -1,2$ °С, а для більш холодних регіонів, що характеризуються $t_{\text{оп}} \leq -1,2$ °С, дане співвідношення становить приблизно 0,75.

4. Застосування комбінованих теплоутилізаційних систем для нагрівання зворотної води системи теплопостачання та дуттьового повітря забезпечує зростання ККД котла на $6 \div 11$ % при терміні окупності витрат на впровадження до 3 років.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Fialko N. M., Navrodsкая R.A., Gnedash G.A., Presich G.A., Stepanova A.I.* Increasing the efficiency of boiler plants of communal heat energy by combining the

heat of the exhaust-gases, International Scientific Journal "Alternative Energy and Ecology", 2014, № 15, P. 126-129. (Rus.)

2. *Shi X., Che D., Agnew B., Gao J.* An investigation of the performance of compact heat exchanger for latent heat recovery from exhaust flue gases, International Journal "Heat Mass Transfer", 2011, № 54, P. 606-615. (Eng.)

3. *Fialko N. M., Aronov I.Z., Navrodsкая R.A., Presich G.A.* Effectiveness of condensing heat utilizers in heating systems, Industrial Heat Engineering, 2003, V. 25, № 3, P. 36-41. (Rus.)

4. *Dolinskiy A.A., Fialko N.M., Navrodsкая R.A., Gnedash G.A.* Basic principles of heat recovery technologies for boilers of the low thermal power, Industrial Heat Engineering, 2014, V. 36, № 4, P. 27-35. (Rus.)

**ENERGY-EFFICIENT HEAT RECOVERY
SYSTEM FOR HEATING THE BACKWARD
HEATING SYSTEM WATER AND BLAST AIR OF
MUNICIPAL BOILERS**

**Navrodszkaya R.A., Fialko N.M., Gnedash G.A.,
Sbrodova G.A.**

Institute of Engineering Thermophysics of the National
Academy of Sciences of Ukraine,
vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

An effective heat-recovery technology with combined use of heat for heating the backward heating system water and blast air of boilers for municipal heat power engineering is proposed. An analysis of such characteristics of the system as its heat output, an increase in the efficiency of the boiler and the amount of condensate formed. The regularity of the influence of the ratio of heat exchange areas of water- and air-heating equipment, as well as climatic conditions, on the annual heat production in a combined heat recovery system is illustrated. From the condition of the maximum of this annual production, a rational ratio of heat exchange areas of said equipment for the regions of Ukraine with different climates is determined. With a rational ratio of areas for different cities of Ukraine, the values of the maximum and average annual increase in the efficiency of the boiler are

given. References 4, tables 2, figures 3.

Key words: gas-fired boiler plants, heat recovery of exhaust-gases, heating of water and air, combined heat recovery systems, increase in coefficient of efficiency.

1. *Fialko N. M., Navrodszkaya R.A., Gnedash G.A., Presich G.A., Stepanova A.I.* Increasing the efficiency of boiler plants of communal heat energy by combining the heat of the exhaust-gases, International Scientific Journal "Alternative Energy and Ecology", 2014, № 15, P. 126-129. (Rus.)

2. *Shi X., Che D., Agnew B., Gao J.* An investigation of the performance of compact heat exchanger for latent heat recovery from exhaust flue gases, *Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]*, 2011, № 54, P. 606-615. (Eng.)

3. *Fialko N. M., Aronov I.Z., Navrodszkaya R.A., Presich G.A.* Effectiveness of condensing heat utilizers in heating systems, *Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]*, 2003, V. 25, № 3, P. 36-41. (Rus.)

4. *Dolinskiy A.A., Fialko N.M., Navrodszkaya R.A., Gnedash G.A.* Basic principles of heat recovery technologies for boilers of the low thermal power, *Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]*, 2014, V. 36, № 4, P. 27-35. (Rus.)

*Получено 18.09.2017
Received 18.09.2017*