

Технічні науки

УДК 538.9:536.6

**Фіалко Наталія Михайлівна**

*доктор технічних наук, професор,  
член-кореспондент НАН України, завідувача відділом  
Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Fialko Nataliia**

*Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Corresponding Member NAS of Ukraine, Head of the Department  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Навродська Раїса Олександрівна**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,  
провідний науковий співробітник  
Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Navrodska Raisa**

*Candidate of Technical Sciences,  
Senior Scientific Researcher, Leading Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Шевчук Світлана Іванівна**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Shevchuk Svitlana**

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Новаківський Максим Олександрович**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Novakivskyi Maksym**

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**КОМБІНОВАНІ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНІ СИСТЕМИ З  
ПОГЛИБЛЕНИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ  
КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК  
КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ  
С УГЛУБЛЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ  
КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК  
COMBINED HEAT RECOVERY SYSTEMS WITH DEEPER COOLING  
OF EXHAUST GASES BOILER PLANTS**

*Анотація.* Для водогрійних котельних установок систем тепlopостачання наводяться теплові схеми глибокої утилізації теплоти відхідних димових газів. Виконано аналіз ККД і коефіцієнта використання теплоти палива (КВТП) котла та температури відхідних газів протягом опалювального періоду для двох запропонованих варіантів схем, призначених для нагрівання різних теплоносіїв. Обґрунтовано вибір раціональної системи теплоутилізації.

**Ключові слова:** газоспоживальні котельні установки, відхідні гази, системи теплоутилізації, різні теплоносії, ефективність.

*Аннотация.* Для водогрейных котельных установок систем теплоснабжения приводятся тепловые схемы глубокой утилизации теплоты отходящих дымовых газов. Проведен анализ КПД и коэффициента использования теплоты топлива (КИТТ) котла и температуры отходящих газов в течение отопительного периода для двух предложенных вариантов схем, предназначенных для нагрева

*различных теплоносителей. Обоснован выбор рациональной системы теплоутилизации.*

**Ключевые слова:** *газопотребляющие котельные установки, отходящие газы, системы теплоутилизации, различные теплоносители, эффективность.*

**Summary.** *For water-heating boiler plants of heat supply systems, thermal schemes of deep heat recovery of exhaust gases are given. The efficiency and coefficient the use heat of fuel of boiler and exhaust gas temperature during the heating period for the two proposed variants of schemes intended for heating of different heat-transfer agents were analyzed. The choice of a rational heat recovery system is justified.*

**Key words:** *gas-fired boiler plants, exhaust gases, heat recovery systems, various heat-transfer agent, efficiency.*

**Вступ.** Ефективність використання теплоутилізаційних технологій котельних установок визначається глибиною охолодження відхідних газів, а саме рівнем зменшення їхньої температури. При зниженні цієї температури нижче точки роси водяної пари, що міститься в газах, реалізується використання теплоти конденсації частини пари, яка конденсується. І чим нижчий рівень температури вихідних газів, тим вищий обсяг зконденсованої пари. Рівень зниження даної температури залежить від характеристик застосовуваних теплоносіїв для використання утилізованої теплоти і ефективного компонування в теплоутилізаційних системах відповідного теплообмінного обладнання. Дана робота присвячена розробленню та дослідженню для газоспоживальних котельних установок нових теплоутилізаційних систем підвищеної ефективності.

Найбільш поширеною схемою теплоутилізації є схема з попереднім підігрівом зворотної тепломережної води перед надходженням її до котла [1–2]. При такій схемі теплоутилізації не реалізується глибоке

охолодження димових газів протягом усього опалювального періоду через високу температуру зворотної води в певних режимах роботи котла. Для підвищення ефективності використання палива в комунальних котлах розроблено комбіновані теплоутилізаційні системи [3–6]. У цих системах після зазначеного водогрійного теплоутилізатора встановлюються теплоутилізатори для нагрівання інших теплоносіїв, в яких існує потреба котелень, і які мають меншу температуру меншу, ніж зворотна вода. Такими теплоносіями слугують дуттьове повітря і холодна вода, що надходить в систему хімводоочищення.

**Мета** роботи полягає у підвищенні ефективності використання теплоти палива (КВТП) газоспоживальних опалювальних котельних установок шляхом застосування теплоутилізаційних технологій з нагріванням теплоносіїв різного призначення.

**Методика проведення досліджень.** Для визначення основних характеристик теплоутилізаційних систем використовувалися відомі методи теплового розрахунку котельних установок та дані експериментальних досліджень, отриманих авторами [7].

**Результати досліджень.** Розрахункові дослідження виконувались з використанням в системах теплоутилізації газоспоживального опалювального котла КСВа – 2,0Г номінальною теплопродуктивністю 2 МВт. Вихідні дані досліджень наведено в таблиці 1.

Розглядалися два варіанти систем глибокої утилізації теплоти відхідних газів котла, призначені для нагрівання зворотної тепломережної води котельні, холодної води, що надходить в систему хімводоочищення, та дуттьового повітря (рис. 1). Для підігрівання цих теплоносіїв застосовуються відповідні теплоутилізатори (ВП, ВП ХВО та ПН). З метою запобігання конденсатоутворенню в газовідвідних трактах у теплоутилізаційних системах запропоновано використання комплексу теплових методів - повітряного та підсушування охолоджених димових газів у газопідігрівачі ГП. Для реалізації повітряного методу

встановлюється додатковий повітропідігрівач ДПН, в якому відхідними газами котла нагрівається частина повітря, що надходить для підмішування у вихідний газохід [2; 8].

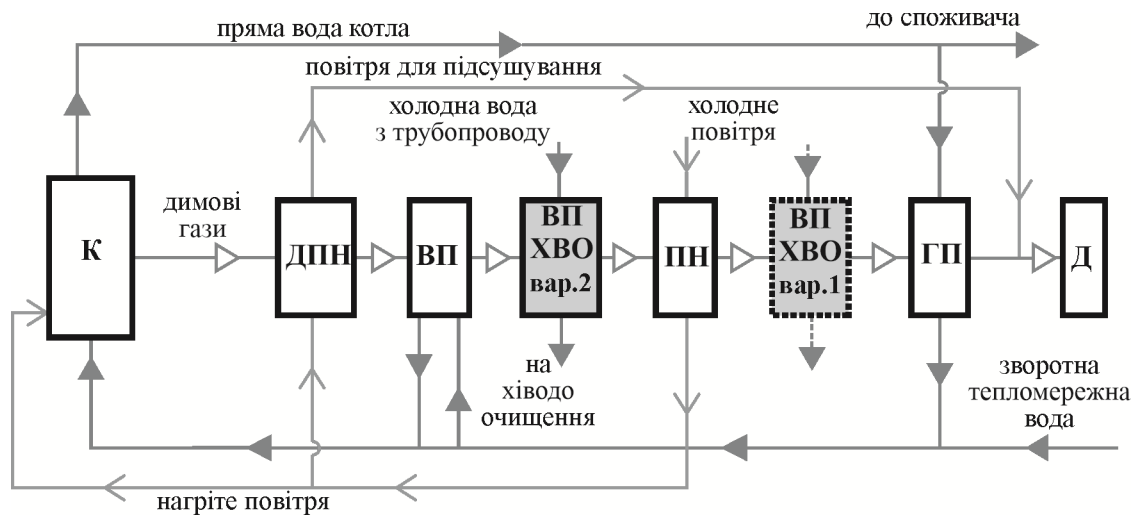
Таблиця 1

**Вихідні дані**

Найменування параметру	Значення
Потужність котла, %	30 ÷ 100
Теплопродуктивність котла у номінальному режимі, МВт	2,0
Витрата природного газу, м <sup>3</sup> /год	70 ÷ 200
Витрата димових газів, кг/с	0,3 ÷ 0,9
Температура газів на виході з котла в номінальному режимі, °С	157
Коефіцієнт надлишку повітря	1,1
Вологовміст газів на виході з котла, кг /кг с.г.	0,135
Витрата води через котел, кг/с	19
Витрата холодної води на ХВО, кг/с	0,24 ÷ 0,38
Температура зворотної води, °С	30 ÷ 70
Температура води на ХВО, °С	5
Температура навколишнього середовища, °С	-20 ÷ +10
Розрахункова температура повітря для системи опалення, °С	-20
Розрахунковий перепад температур для системи опалення $\Delta t_0$ , °С	25
ККД котла без теплоутилізаторів за нижчою теплотою згоряння палива, %	92 ÷ 94

Варіантом 1 у роботі розглядається відома теплоутилізаційна система, у якій використання теплоти димових газів реалізується при послідовному надходженні димових газів від котла в теплоутилізатор для нагрівання зворотної тепломережної води, далі в теплоутилізатор для попереднього підігрівання дуттьового повітря ДПН, потім в теплоутилізатор для нагрівання холодної води на хімводоочищення ВП ХВО вар.1 (без використання теплоутилізатора ВП ХВО вар. 2).

Варіантом 2 в роботі слугує теплоутилізаційна система, в якій на відміну від першого варіанту теплоутилізатор для нагрівання води на хімводоочищення (ВП ХВО вар. 2) встановлено перед теплоутилізатором ПН При цьому теплоутилізатор ВП ХВО вар.1 вже не використовується.

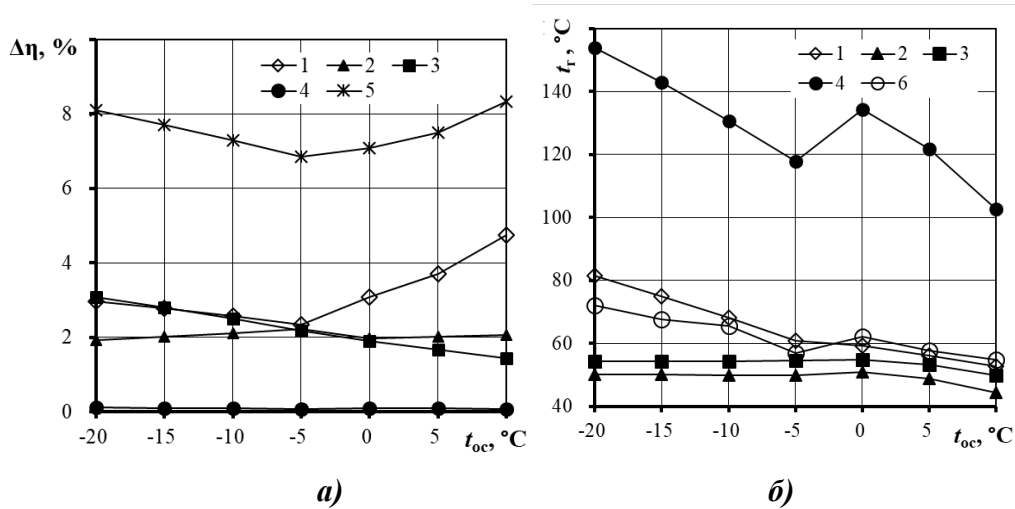


**Рис. 1. Варіанти теплоутилізаційних систем опалювальних котлів при нагріванні різних теплоносіїв**

К – котел; ДПН – додатковий повітрянагрівач; ВП – водопідігрівач; ВП ХВО – підігрівач води на хімоводоочищення; ПН – повітрянагрівач; ГП – газопідігрівач; Д – димова труба

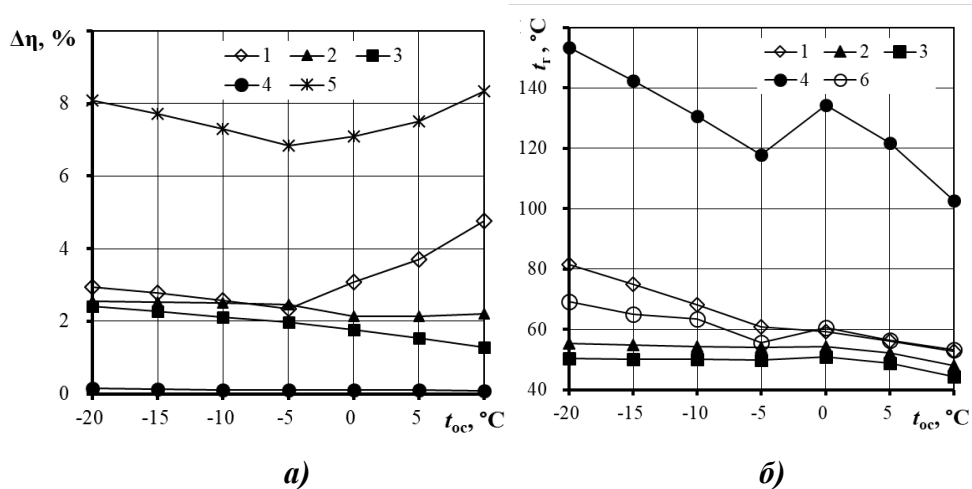
В досліджуваних системах водогрійні теплоутилізатори компонувалися з пучка оребрених біметалічних труб (сталева основа та алюмінієве оребрення). Повітрогрійними теплоутилізаторами слугували пластинчасті теплообмінники з нержавіючої сталі. На рис. 2, 3 наведено результати залежності від температури навколишнього середовища  $t_{nc}$  протягом опалювального періоду коефіцієнта використання теплоти палива котла КВТП котла  $\Delta\eta$  та температури відхідних газів  $t_r$  при різному компонуванні теплообмінників-теплоутилізаторів в теплоутилізаційній системі для двох розглянутих варіантів.

Як видно з наведених результатів, загальні показники теплоутилізаційних систем (коефіцієнт використання теплоти палива котла КВТП котла  $\Delta\eta$  і температури відхідних газів  $t_r$ ) є дуже близькими для обох варіантів. Так для обох систем КВТП котла змінюється в межах  $\Delta\eta - 6,8 \div 8,3\%$ , а температура вихідних газів відповідає діапазону  $t_r - 45 \div 72$  °С. Перерозподіл цих характеристик у розглянутих системах здійснюється в окремих теплоутилізаторах.



**Рис. 2. Рівні приросту ККД та КВТП котла  $\Delta\eta$  (а) та температури відхідних газів  $t_r$  (б) для всієї теплоутилізаційної системи та окремих теплоутилізаторів за умови розміщення ВП ХВО після повітрянагрівача ПН (варіант 1)**

1 – водопідігрівач; 2 – підігрівач води на хімоводоочищення; 3 – повітрянагрівач; 4 – додатковий повітрянагрівач; 5 – вся теплоутилізаційна система; 6 – температура у гирлі димової труби



**Рис. 3. Рівні приросту ККД та КВТП котла  $\Delta\eta$  (а) та температури відхідних газів  $t_r$  (б) для всієї теплоутилізаційної системи та окремих теплоутилізаторів за умови розміщення ВП ХВО перед повітрянагрівачем ПН (варіант 2)**

1 – водопідігрівач; 2 – підігрівач води на хімоводоочищення; 3 – повітрянагрівач; 4 – додатковий повітрянагрівач; 5 – вся теплоутилізаційна система; 6 – температура у гирлі димової труби

Отримані результати дозволяють при створенні теплоутилізаційних систем враховувати інші особливості конструювання теплообмінників-теплоутилізаторів у цих системах. А саме: використання другого з розглянутих варіантів систем, при розміщенні теплоутилізатора для

нагрівання дуттьового повітря ПН після теплоутилізатора для нагрівання води на хімоводоочищення (ВП ХВО вар.2), дозволяє конструкційне агрегування теплоутилізаторів ВП та ВП ХВО в одному корпусі. Це забезпечує зменшення втрат теплоти з поверхні з'єднувальних трубопроводів та газоходів, більш високу компактність теплоутилізаційної установки, що дуже важливо за умов дефіциту вільних площ у котельнях. На основі проведених досліджень можна зробити вибір на користь пріоритетного застосування цього варіанту.

### **Висновки.**

1. Результати досліджень показали, що застосування для опалювальних котлів комунальної теплоенергетики пропонує комбінованих теплоутилізаційних систем дозволяє реалізовувати режими їхньої роботи зі зниженням температури газів нижче точки роси протягом усього опалювального періоду і завдяки цьому підвищити КВТП котла на 6,8–8,3%.

2. Переважним варіантом теплоутилізаційної системи є розміщення теплообмінника ВП ХВО перед повітрянагрівачем ПН. Це рішення дозволяє агрегувати два теплоутилізатори (ВП та ВП ХВО) в одному корпусі, що забезпечує підвищення компактності даної установки та зменшення тепловтрат від з'єднувальних газоходів та трубопроводів.

### **Література**

1. Ефимов А. В., Гончаренко А. Л., Гончаренко Л. В., Есипенко Т. А. Современные технологии глубокого охлаждения продуктов сгорания топлива в котельных установках, их проблемы и пути решения: монография. Харьков: НТУ «ХПИ». 2017. 233 с. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/32826>.
2. Долинский А. А., Фиалко Н. М., Навродская Р. А., Гнедаш Г. А. Основные принципы создания теплоутилизационных технологий для котельных малой теплоэнергетики. Промышленная теплотехника.



2014. № 4. С. 27–36.
3. Fialko N. M., Navrodska R. O., Shevchuk S. I., Gnedash G. O. The environmental reliability of gas-fired boiler units by applying modern heat-recovery technologies. *Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk.* 2020. No2. P. 96–100. doi: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/096>
  4. Фіалко Н. М., Гнедаш Г. О., Навродська Р. О., Пресіч Г. О., Шевчук С. І. Підвищення ефективності комбінованих теплоутилізаційних систем газоспоживальних котельних установок. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2019. Т. 29. № 6. С. 79–82. doi: <https://doi.org/10.15421/40290616>
  5. Fialko N.M., Navrodska R.O., Gnedash G.O., Presich G.O., Shevchuk S.I. Study of Heat Recovery Systems for Heating and Moisturing Combustion Air of Boiler Units. *Nauka innov.* 2020. V. 16. No. 2. P. 47-53. doi: <https://doi.org/10.15407/scin16.03.047>
  6. Комбіновані теплоутилізаційні системи для газоспоживальних котлів комунальної теплоенергетики: монографія / Н.М. Фіалко та ін.: Київ: «Про формат». 2019. 192 с.
  7. Навродская Р.А., Степанова А.И., Шевчук С.И., Гнедаш Г.А., Пресич Г.А. Экспериментальное исследование теплообмена при глубоком охлаждении продуктов сгорания газопотребляющих котлов. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2018. Т. 28. №6. С. 103–108. doi: <https://doi.org/10.15421/40280620>
  8. Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок: монографія / Н.М. Фіалко и др.: Киев: «Про формат». 2018. 248 с.