

Технічні науки

УДК 662.99:536.24

**Фіалко Наталія Михайлівна**

*доктор технічних наук, професор,  
член-кореспондент НАН України, завідувач відділу  
Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Fialko Nataliia**

*Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Corresponding Member of NAS of Ukraine, Department Head  
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 (PhD),  
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*

**Гнедаш Георгій Олександрович**

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

**Gnedash Georgii**

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

**Пресіч Георгій Олександрович**

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

**Presich Georgii**

*Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Scientific Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**ЕФЕКТИВНА ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ З  
ПОВІТРОГРІЙНИМ ОБЛАДНАННЯМ ДЛЯ СКЛОВАРНИХ ПЕЧЕЙ  
EFFICIENT HEAT-RECOVERY TECHNOLOGY WITH AIR HEATING  
EQUIPMENT FOR GLASS FURNACES**

***Анотація.** Запропоновано енергозберігаюче технічне рішення повітрогрійного теплоутилізаційного обладнання, яке призначене для попереднього підігріву повітря на горіння, що надходить до регенераторів промислових газоспоживальних скловарних печей.*

***Ключові слова:** зменшення витрати палива, відхідні димові гази, повітря на горіння, кінцевий рекуператор, кільцеві інтенсифікатори теплообміну.*

***Summary.** An energy-saving technical solution for air-heating heat-recovery equipment for preheating combustion air entering the regenerators of industrial gas-fired glass melting furnaces is proposed.*

***Key words:** reduction of fuel consumption, flue gases, combustion air, terminal recuperator, annular heat exchange intensifiers.*

Ощадне споживання паливно-енергетичних ресурсів для багатьох виробничих підприємств України стає все більш актуальною проблемою. Досить значні витрати енергоресурсів на виробництво промислової продукції спостерігаються при високотемпературному виробництві [1] продукції, до яких належать і склоробні підприємства, що експлуатують скловарні печі. При цьому більшість паливоспоживальних скловарних печей задля підвищення їхнього ККД оснащені системами регенерації (або рекуперації) для нагрівання повітря на горіння. Однак, температура відхідних газів після такого повітрогрійного устаткування залишається ще надто високою (зазвичай  $300 \div 650$  °C [2]).

Одним із шляхів підвищення енергетичної ефективності обладнання скловарних виробництв, а отже й економії енергоресурсів, є глибша утилізація їхніх теплових викидів шляхом застосування теплоутилізаційних технологій. Утилізація теплоти відхідних димових газів паливоспоживального обладнання дозволяє не тільки підвищити ефективність такого обладнання, а й покращити його екологічні показники [3-7].

Для підвищення ефективності використання скидної теплоти шляхом застосування теплоутилізаційних технологій до прикладу в скловарних печах традиційно використовувались водогрійні теплоутилізатори, у яких зазвичай нагрівається вода для потреб опалення та гарячого водопостачання склоробних підприємств та прилеглих до них житлових і промислових об'єктів [8-10]. Ефективність таких технологій є недостатньою через обмеженість потреби в теплоенергії у вигляді гарячої води та сезонність її споживання у системі опалення. Переважно ж потенціал скидної теплоти сучасних скловарних печей є вищим у порівнянні з використовуваним у традиційних теплоутилізаційних технологіях. Збільшення тривалості експлуатації систем утилізації скидної теплоти протягом року може бути досягнуто шляхом її використання для

попереднього нагрівання повітря на горіння перед надходженням його до регенераторів печей.

Встановлення поверхневих повітрогрійних теплоутилізаторів за промисловими печами донедавна було проблематичним через значні габарити та вартість цього устаткування. Однак, останнім часом розроблено нові конструкції повітрогрійних теплоутилізаторів, так званих кінцевих рекуператорів, які можуть завдяки цілорічному використанню конкурувати з водогрійними теплоутилізаторами [11].

Інститутом технічної теплофізики НАН України запропоновано нове технічне рішення повітрогрійного теплоутилізаційного обладнання – кінцевого рекуператора (рис. 1), в якому завдяки охолодженню відхідних димових газів реалізується попередній підігрів повітря перед надходженням його в регенератори печі. На рис. 2 схематично зображено його загальний вигляд. Теплообмінна поверхня цього теплоутилізатора компонується з панелей пакетів, утворених трубами з мембранами на зовнішніх поверхнях (рис. 2 б). У панелях використовуються труби з кільцевими інтенсифікаторами теплообміну (рис. 2 в), завдяки яким забезпечується інтенсифікація теплообміну всередині труб в  $1,6 \div 1,9$  разів при помірному (порівняно з іншими методами інтенсифікації теплообміну) зростанні аеродинамічного опору з боку повітря, що нагрівається. Такий вибір поверхонь нагріву для повітронагрівачів печей (кінцевих рекуператорів) обумовлений особливостями відхідних газів, які зазвичай характеризуються високим рівнем твердого технологічного виносу [10]. Рух теплоносіїв виконано перехресним із проходженням повітря у трубах, а димових газів у міжтрубному просторі.

Розрахункові дослідження з метою визначення показників ефективності системи «регенератор – кінцевий рекуператор» проведено для регенеративних скловарних печей виробництва тарної продукції. Використовувалися відомі методи теплового розрахунку теплообмінників

регенеративного та поверхневого типів [12; 13], а також результати власних досліджень динаміки запилення робочих поверхонь теплоутилізаторів скловарних печей [10].

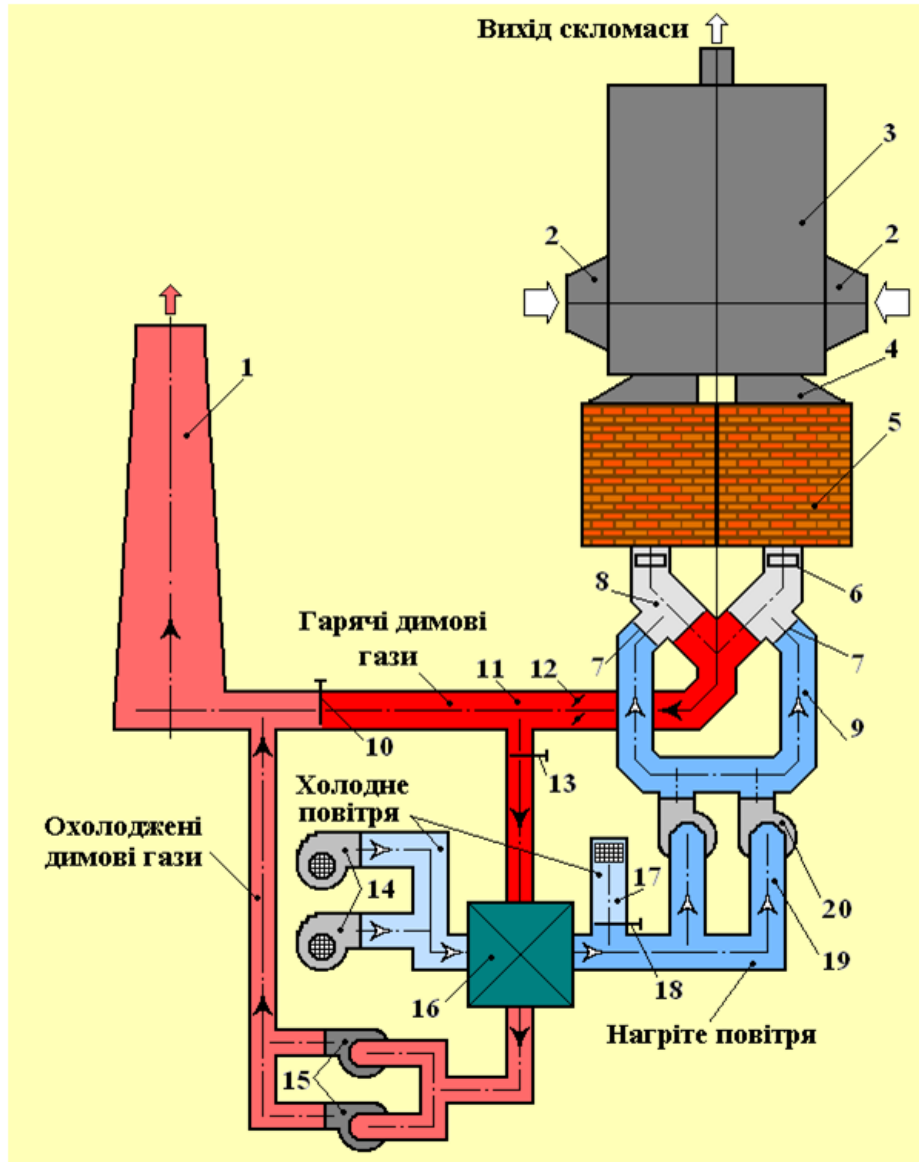
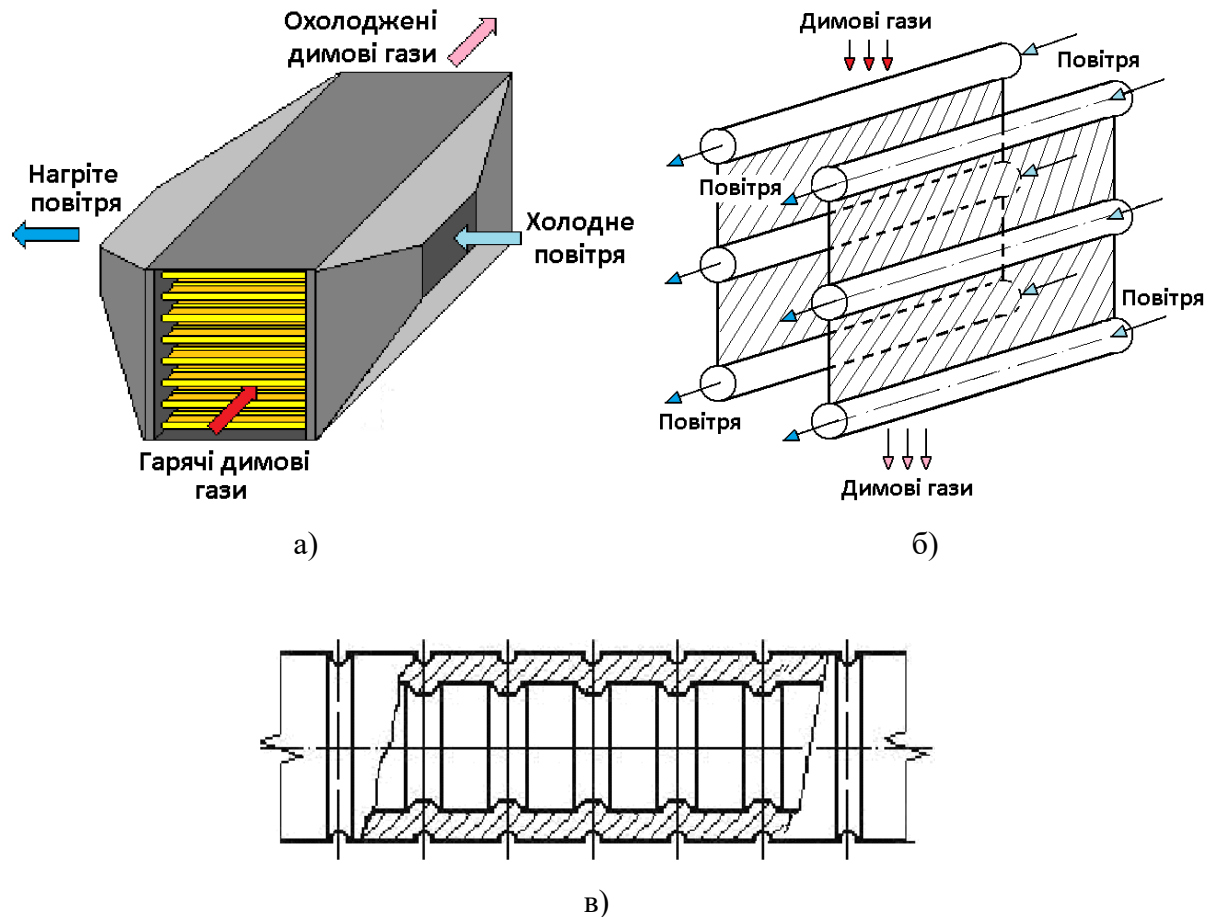


Рис. 1. Схема утилізації теплоти відхідних газів скловарної печі:

- 1 – димова труба; 2 – завантажувальна кишеня; 3 – варильна частина печі;  
4 – пального пристрій; 5 – регенератор; 6, 7 – перевідний та регулювальний шибер;  
8 – димові канали; 9 – повітряні канали; 10, 13, 18 – шибери відсікання потоку; 11 –  
газовідвідний тракт; 12 – блок поворотних шиберів; 14, 20 – вентилятори; 15 –  
димососи, 16 – кінцевий рекуператор, 17 – відбір повітря з атмосфери; 19 – повітровід  
первоно нагрітого повітря (вихід з рекуператора)

Значення початкової температури димових газів на вході в кінцевий рекуператор відповідало розрахунковим значенням кінцевої температури на виході з регенератора на час надходження у регенератор вже нагрітого до певної температури повітря.



**Рис. 2. Схематичне зображення кінцевого рекуператора:**

- а) – загальний вид; б) – схематичне розташування мембранних панелей та потоків теплоносіїв; в) – труба з кільцевими інтенсифікаторами теплообміну

Основні вихідні дані виконання теплових розрахунків регенератора і кінцевого рекуператора наведено у таблиці 1.

*Таблиця 1*

**Основні характеристики регенератора та рекуператора**

Найменування, розмірність	Значення
Витрата димових газів, кг/с	2,3
Витрата повітря, кг/с	2,1

Температура газів на виході з регенератора (на вході до рекуператора), °С	400 ÷ 500
Температура повітря на вході до регенератора, °С	200 ÷ 250
Температура повітря на вході до рекуператора, °С	20

При впровадженні теплоутилізаційних систем, особливо з повітрогрійним обладнанням, виникає проблема вибору конструкційних матеріалів для теплоутилізаторів. Як свідчать результати досліджень [10], температура підігріву повітря в металевих рекуператорах обмежена термостійкістю матеріалів, що застосовуються, наприклад, в рекуператорах з нелегованого металу повітря доцільно підігрівати не вище 250 °С.

Результати розрахункових досліджень теплоутилізаційної системи (рис. 1) з кінцевим рекуператором при його використанні протягом усього періоду експлуатації печі наведено в табл. 2.

Таблиця 2

### Технічні характеристики кінцевого рекуператора

Найменування, розмірність	Значення
Теплопродуктивність, кВт	430
Витрата димових газів, кг/с	2,3
Коефіцієнт надлишку повітря у димових газах	1,2
Температура газів на вході, °С	500
Температура газів на виході, °С	320
Витрата повітря, кг/с	2,1
Температура повітря на вході, °С	20
Температура повітря на виході, °С	220
Аеродинамічний опір зі сторони газів, Па	350
Аеродинамічний опір за повітряною стороною, Па	400
Ефективність регенератора	39,0
Ефективність рекуператора	9,0
Ефективність регенератора разом з рекуператором	48,0
Габаритні розміри, мм:	
довжина	2800
ширина	1500
висота	3200
Маса, кг	4200

Отримані результати свідчать, що застосування кінцевих рекуператорів дозволяє істотно підвищити ККД печі шляхом охолодження димових газів, що відходять від регенераторів печі. Як видно з табл. 2 у розглянутих умовах при експлуатації кінцевих рекуператорів димові гази охолоджуються на 180 °С, а повітря на горіння підігрівається на 200 °С. Це дозволяє зменшити споживання палива на піч, витраченого на нагрівання повітря до температури 200 °С. При цьому зменшення споживання палива на піч безпосередньо не відповідає підвищенню ефективності рекуператора, а дещо нижче. Це викликано деяким зниженням ефективності регенератора при надходженні до нього нагрітого повітря.

Як показали розрахунки, в Україні термін окупності витрат на впровадження рекуператора для скловарної печі мінімальний та при нагріванні холодного повітря на 200 °С не перевищує 0,5 роки.

### **Висновки.**

1. Запропоновано використання в теплоутилізаційних системах для паливоспоживальних промислових печей регенеративного типу нового повітрогрійного обладнання – кінцевого рекуператора, теплообмінна поверхня якого компонується з панелей, утворених трубами з інтенсифікаторами теплообміну на внутрішній стороні та мембранами на зовнішній, що забезпечить можливість виконувати ефективне очищення робочих поверхонь рекуператора від відкладень технологічного пилу, що міститься у відхідних димових газах печі.

2. Показано, що при застосуванні кінцевих рекуператорів забезпечується в системі «регенератор - рекуператор» сумарне підвищення ККД печі на 48 %, де 39 % – приріст ККД у регенераторі, а 9 % – у рекуператорі.



## Література

1. Буравова А. В., Рахманов Ю. А. К вопросу рекуперации теплоты газов печей термообработки металлических изделий. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент»*. 2014. № 1. 17 с. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-rekuperatsii-teploty-gazov-pechey-termoobrabotki-metallicheskih-izdeliy>
2. Єрофеєва А. А. Підвищення ефективності споживання природного газу промисловими камерними печами. «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування»: збірник матеріалів 6-го міжнародного конгресу, Львів: Західно-Український Консалтинг Центр (ЗУКЦ). 2020. 166 с. URL: <https://science.lpnu.ua/uk/ekokongres-2022/poperedni-zbirnyky-tez>
3. Fialko N. M., Stepanova A. I., Presich G. A., Gnedash G. A. Analysis of the efficiency of a heat recovery unit for heating and humidifying the blast air of the boiler. *Industrial heat engineering*. 2015. № 37(4). P. 71-79.
4. Fialko N., Presich G., Navrodska R., Gnedash G. Ecological efficiency of combined heat recovery systems waste of exhaust gases for boiler plant. *Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska politekhnika. Teoriya i praktyka budivnytstva*. 2013. Vol. 755. P. 429-434. URL: <https://science.lpnu.ua/sctp/all-volumes-and-issues/volume-755-2013-1/ekologichna-efektivnist-kombinovanih-sistem>
5. Fialko N. M., Presich G. A., Gnedash G. A., Shevchuk S. I., Dashkovska I. L. Increase the efficiency of complex heatrecovery systems for heating and humidifying of blown air of gasfired boilers. *Industrial Heat Engineering*. 2018. № 40(3). P. 38-45. doi: <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.06>
6. Fialko N. M., Gnedash G. O., Navrodska R. O., Presich G. O., Shevchuk S. I. Improving the efficiency of complex heat-recovery systems for gas-fired boiler installations. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2019. № 29(6). P. 79-82.

doi: <https://doi.org/10.15421/40290616>

7. Fialko N. M., Presich G. A., Navrodska R. A., Gnedash G. A. Improvement of the complex heat-recovery system of exhaust-gases of boilers for heating and humidifying blown air. *Industrial Heat Engineering*. 2011. № 33(5). P. 88–95.
8. Fialko N., Navrodska R., Sherenkovsky Ju., Stepanova A., Sarioglo A. Utilizatsiya teploty otkhodyashchikh gazov steklovarenykh pechey s ispol'zovaniyem membrannykh trub. K. : «Sophia-A». 2016. ISBN 978-966-02-7982-7
9. Fialko N. M., Stepanova A. I., Navrodska R. A. Effektivnost' teploutilizatorov steklovarenykh pechey v usloviyakh zapylennosti poverkhnostey nagreva. *Yenergetika i avtomatika*. 2016. № 3. P. 28-35. URL:<http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/8323/78> 75
10. Fialko N., Prokopov V., Navrodska R., Shevchuk S., Stepanova A. Results of experimental studies of the heat engineering characteristics of industrial furnace water-heating heat recovery units. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2022. № 44(1). P. 84-91. doi: <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2022.10>
11. Fialko N. M., Prokopov V. H., Navrodska R. O., Shevchuk S. I., Presich G. O. Some features of the heat recovery technologies application for gas-fired glass furnaces. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2021. № 31(4). P. 109–113. doi: <https://doi.org/10.36930/40310418>
12. Кошельник А. В. Определение коэффициентов теплоотдачи в каналах насадок регенераторов плавильных печей. *Вестник ХГПУ*, 1998. № 13. С. 45–48.
13. Кузнецов Н. В., Митор В. В., Дубовской И. Е. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. Москва, Эколит, 2011.