



**Н. М. Фіалко, В. Г. Прокопов, Р. О. Навродська, С. І. Шевчук, Г. О. Пресіч**

*Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна*

## ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ГАЗОСПОЖИВАЛЬНИХ СКЛОВАРНИХ ПЕЧЕЙ

Проаналізовано особливості корисного використання скидної теплоти відхідних газів газоспоживальних скловарних печей, оснащених регенераторами для нагрівання повітря на горіння. Ці особливості зумовлені відносно високою температурою запічних газів (зазвичай 300-650 °C) та наявністю в них технологічного виносу у вигляді пилу та газової фази із шкідливих і хімічно агресивних сполук, таких як окиси вуглецю, сірки та азоту. Такі особливості призводять до ускладнень реалізації теплоутилізаційних технологій для скловарних печей. Викладено результати досліджень щодо ефективності для цих печей розроблених теплоутилізаційних технологій з теплоутилізаційним устаткуванням (теплоутилізаторами) для різних потреб використання утилізованої теплоти. Запропоновано варіанти цих технологій та виконано розрахунки основних характеристик їхнього призначення. В одному з варіантів використано водонагрівальні панельні теплоутилізатори модульного типу (ТВМ), призначені для нагрівання води для забезпечення потреб підприємств та прилеглих об'єктів у тепловій енергії на опалення, гаряче водопостачання та технологічні потреби. Другий варіант слугує попередньому нагріванню повітря на горіння в кінцевому рекуператорі (КР) перед надходженням його до регенераторів печей. В обох варіантах запропонованих технологій передбачена можливість очищення стисненим повітрям робочих поверхонь теплоутилізаційного устаткування від відкладень технологічного пилу. Наведено експериментальні дані щодо високої ефективності цього очищення, які отримані під час проведення пусконаладжувальних випробувань відповідного устаткування. Виконано зіставлення основних показників ефективності розроблених технологій. У цих технологіях передбачено антикорозійний захист димових труб в умовах охолодження димових газів шляхом застосування методу байпасування частини гарячих запічних газів повз теплоутилізатори. Цей метод сприяє запобіганню конденсації утворенню в димових трубах та покращенню їхніх режимних характеристик щодо розсіювання в навколишньому середовищі шкідливих речовин. Проаналізовано вплив на економічні показники рекуператора кінцевої температури нагрітого повітря, для визначення її раціонального значення. Показано, що застосування запропонованих технологій утилізації скидної теплоти відхідних газів скловарних печей забезпечує підвищення ефективності використання палива печі на 5-15 % за терміну окупності витрат на їхнє впровадження до одного року.

**Ключові слова:** відхідні гази скловарних печей; водо- та повітрянагрівальні теплоутилізатори; ефективність теплоутилізації; очищення робочих поверхонь.

### Вступ / Introduction

Проблема економії паливно-енергетичних ресурсів стає дедалі актуальнішою для багатьох виробничих підприємств України. Витрати енергоресурсів на виробництво промислової продукції є досить значними, особливо це стосується високотемпературних виробництв [2], до яких належать і склоробні підприємства, що

експлуатують скловарні печі. При цьому більшість паливоспоживальних скловарних печей для підвищення їхнього ККД оснащені системами регенерації (або рекуперативної) для нагрівання повітря на горіння, тобто повітрянагрівальними теплоутилізаторами першого ступеня. Однак температура відхідних газів після цього устаткування залишається ще надто високою (зазвичай 300-

### Інформація про авторів:

**Фіалко Наталія Михайлівна**, д-р техн. наук, професор, член-кореспондент НАН України, завідувач відділу теплофізики ефективних теплотехнологій. Email: nmfialko@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-0116-7673>

**Прокопов Віктор Григорович**, д-р техн. наук, професор, головний науковий співробітник, відділ теплофізики ефективних теплотехнологій. Email: nmfialko@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-9026-8742>

**Навродська Раїса Олександрівна**, канд. техн. наук, пров. наук. співробітник, відділ теплофізики ефективних теплотехнологій. Email: navrodska-ittf@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-7476-2962>

**Шевчук Світлана Іванівна**, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, відділ теплофізики ефективних теплотехнологій. Email: s.i.shevchuk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8046-0039>

**Пресіч Георгій Олександрович**, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, відділ теплофізики ефективних теплотехнологій. Email: navrodska-ittf@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-3728-6490>

**Цитування за ДСТУ:** Фіалко Н. М., Прокопов В. Г., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Пресіч Г. О. Особливості застосування теплоутилізаційних технологій для газоспоживальних скловарних печей. Науковий вісник НЛТУ України. 2021, т. 31, № 4. С. 109–113.

**Citation APA:** Fialko, N. M., Prokopov, V. H., Navrodska, R. O., Shevchuk, S. I., & Presich, G. O. (2021). Some features of the heat recovery technologies application for gas-fired glass furnaces. *Scientific Bulletin of UNFU*, 31(4), 109–113. <https://doi.org/10.36930/40310418>

650 °C [1]). Одним із шляхів підвищення енергетичної ефективності скловарних виробництв, а отже й значної економії енергоресурсів, є поглиблена утилізація їхніх теплових викидів.

*Об'єкт дослідження* – сучасні паливоспоживальні скловарні печі регенеративного типу та їхні особливості.

*Предмет дослідження* – ефективність розроблених теплоутилізаційних технологій для газоспоживальних скловарних печей з регенераторами.

*Мета роботи* – проаналізувати особливості та ефективність застосування для скловарних печей з регенераторами запропонованих теплоутилізаційних технологій з використанням водо- та повітрянагрівального устаткування.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження: встановити базові характеристики розробленого теплоутилізаційного устаткування та оцінити його придатність для експлуатації за скловарними печами з урахуванням їхніх особливостей.

*Наукова новизна отриманих результатів дослідження* – застосування комплексного підходу до аналізу ефективності теплоутилізаційних технологій запічних газів, який враховує теплові й аеродинамічні характеристики запропонованого устаткування та особливості технологій скловаріння.

*Практична значущість результатів дослідження* – отримані дані можна використати під час проєктування систем теплоутилізації відхідних газів скловарних печей та інших паливоспоживальних енергетичних установок.

*Аналіз останніх досліджень та публікацій.* Питання використання (утилізації) скидної теплоти відхідних газів скловарних печей порушували досить давно [6, 8]. Технологія використання цієї теплоти пов'язана зі значними труднощами, зумовленими відносно високою температурою запічних газів та наявністю в них технологічного виносу у вигляді пилу та газової фази із вмістом шкідливих і хімічно агресивних сполук [5]. До того ж зниження температури запічних газів після їхньої теплоутилізації погіршує режими експлуатації димових труб з погляду дотримання умов щодо забезпечення нормативних показників розсіювання шкідливих речовин, що містяться в запічних газах. Зниження цієї температури може також посилювати корозійне зношування димових труб.

Для утилізації теплоти відхідних газів скловарних печей донедавна застосовували водонагрівальне теплоутилізаційне устаткування. Врахування запиленості запічних газів і можливість очищення теплообмінних поверхонь було реалізовано у запропонованому в [8] теплоутилізаційному устаткуванні, яке не набуло поширення через складність конструкційного виконання як власне теплоутилізатора, так і системи очищення. Описаний в [6] теплоутилізатор було оснащено автоматичною системою очищення. Проте це устаткування розроблене для скловарних печей невеликої склопродуктивності. Пропоновані сучасні зарубіжні теплоутилізатори з можливістю очищення робочих поверхонь від відкладень пилу входять до комплексу технологічного устаткування скловарних технологій, яке виготовляють різні зарубіжні фірми (наприклад групи компаній Lisc). Для зазначених теплоутилізаторів характерні висока вартість і складність системи очищення, що обмежує їхнє застосування в Україні.

Використання скидної теплоти відхідних газів скловарних печей регенеративного типу для попереднього

нагрівання повітря перед надходженням його до регенераторів печей дотепер майже не застосовували через великі габарити та вартість повітрянагрівального устаткування. Однак, завдяки енергоощадним тенденціям, пов'язаним з високою вартістю палива, останнім часом з'являються розробки повітрянагрівальних теплоутилізаторів для скловарних печей [1, 2, 3].

Оцінювання технічного стану димових труб промислових печей зі застосуванням систем теплоутилізації здійснено у роботі [10], яка свідчить про посилення корозійного та ерозійного зношування цих труб за умов застосування теплоутилізаційних технологій.

Проаналізувавши літературні джерела, з'ясовано, що використання для скловарних печей ефективних теплоутилізаційних технологій із системами очищення робочих поверхонь для покращення режимів експлуатації димових труб, є актуальним.

*Матеріали та методи дослідження.* Для визначення теплових і аеродинамічних показників відповідного устаткування застосовували відомі методики [7, 9] і враховували результати власних експериментальних досліджень щодо ефективності очищення його теплообмінних поверхонь від твердого технологічного виносу.

## Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

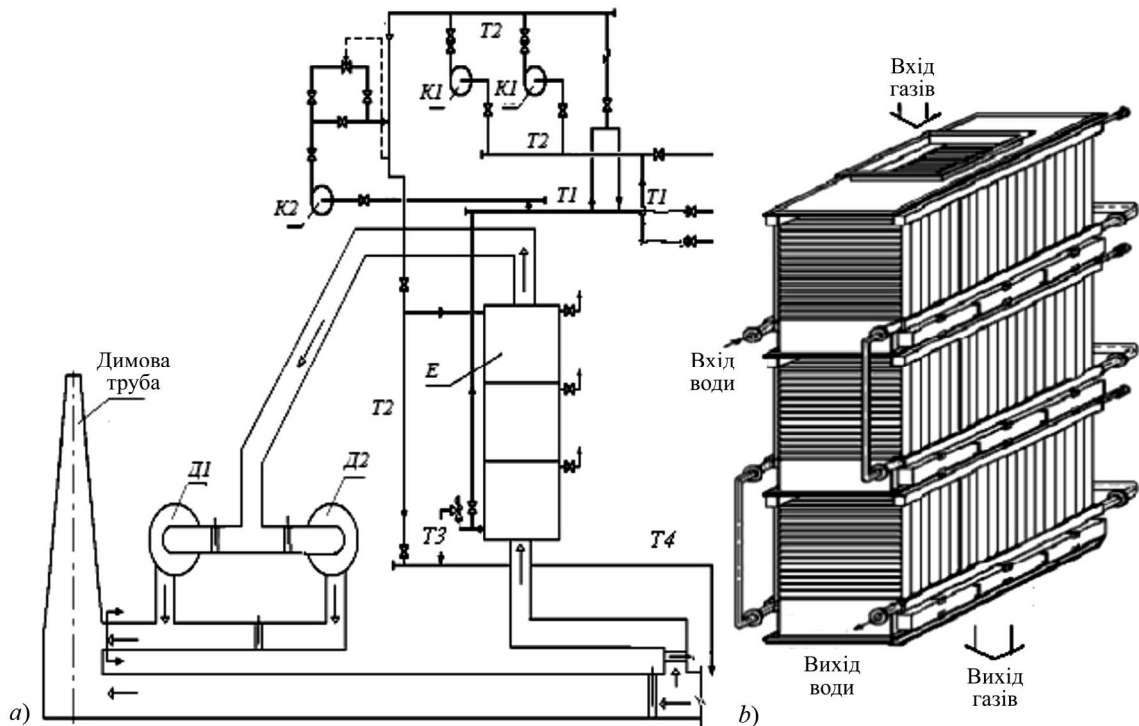
Для утилізації теплоти відхідних газів скловарних печей успішно застосовують водонагрівальне устаткування – теплоутилізатори водонагрівальні модульного типу (ТВМ), розроблені в Інституті технічної теплофізики (ІТТФ) НАН України [4]. Ці теплоутилізатори компонується з необхідної кількості модулів залежно від витрати димових газів. Теплообмінна поверхня модуля набирається зі сталевих панелей, утворених трубами з мембранами. Для запобігання корозії панелі мають захисне антикорозійне покриття, або виготовляються з нержавіючої сталі. Розроблено теплоутилізатори для печей з витратою природного газу від 200 до 2000 м<sup>3</sup>/год.

Конфігурація панелей сприяє зменшенню відкладень пилу в процесі експлуатації теплоутилізатора. Його конструкційне виконання дає змогу виконувати додаткове очищення цих поверхонь стисненим повітрям. На рис. 1 наведено принципову схему теплоутилізаційної установки для скловарних печей з варіантом компонування теплоутилізатора з трьох модулів.

Основні технічні характеристики розроблених теплоутилізаторів ТВМ наведено в табл. 1.

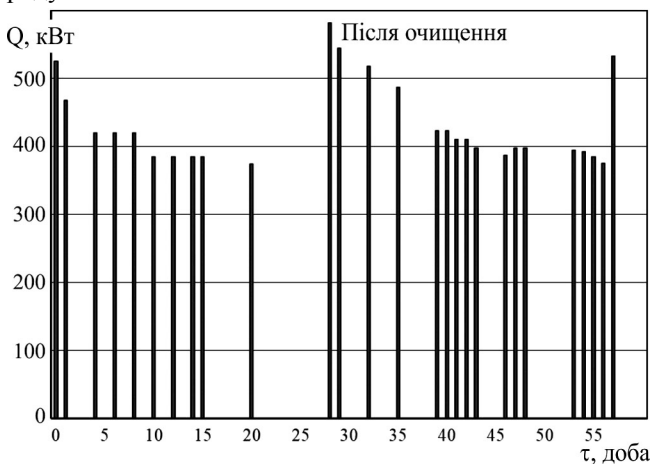
**Табл. 1. Основні технічні характеристики теплоутилізаторів / Main technical characteristics of heat recovery units**

Теплопродуктивність, МВт	0,4 – 2,5
Витрата димових газів, м <sup>3</sup> /год	3000 – 400000
Витрата води, т/год	20 – 120
Температура газів на вході, °С	250 – 550
Температура газів на виході, °С	150 – 200
Аеродинамічний опір, Па	300 – 600
Гідравлічний опір, кПа	30 – 200
Габарити, мм:	
довжина	2500
ширина	1200 – 3600
висота	2000 – 6000
Маса, т	2 – 15
Збільшення коефіцієнта використання теплоти палива КВПТ, %	7 – 15
Термін окупності витрат, років	до 1



**Рис. 1.** Схема теплоутилізаційної установки (а) з теплоутилізатором ТВМ (b), призначеним для нагрівання води системи опалення: *E* – теплоутилізатор; *K* – насоси; *T* – трубопроводи теплової мережі; *T3* – трубопровід підживлювальний; *T4* – трубопровід для спорожнення теплоутилізатора;  $\nabla$  – вентиль, засувка;  $\rightarrow$  – видалення повітря;  $\rightarrow$  – напрямки потоків димових газів і води;  $\nabla$   $\leftarrow$   $\nabla$  – запобіжний і зворотний клапани / Schematic diagram of heat recovery units (a) with a MWH heat exchanger (b) designed to heat water of the heating system, where: *E* – heat exchanger; *K* – pumps; *T* – heat pipelines; *T3* – make-up pipeline; *T4* – piping for emptying the heat exchanger;  $\nabla$  – valve, gate valve;  $\rightarrow$  – venting;  $\rightarrow$  – directions of exhaust gas and water flows;  $\nabla$   $\leftarrow$   $\nabla$  – safety and check valves

На рис. 2 наведено дані про ефективність очищення теплообмінних поверхонь теплоутилізатора, яке практично дає змогу відновлювати його початкову теплопродуктивність.



**Рис. 2.** Динаміка теплопродуктивності ТВМ між очищеннями теплообмінних поверхонь / Dynamics of the heating capacity of the MWH between cleanings of the heat exchange surfaces

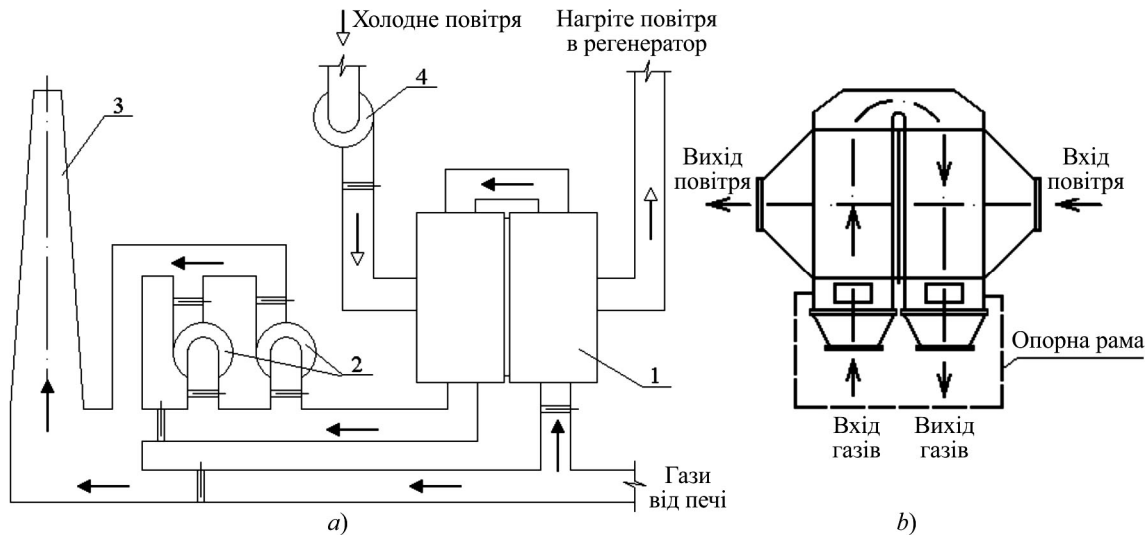
Як випливає із наведених даних, запропоновані теплоутилізатори є ефективними як у тепловому плані, так і в плані їхньої аеродинаміки. Установка теплоутилізаторів ТВМ забезпечує склоробним підприємствам значну економію природного газу на виробництво теплоенергії, що витрачається на потреби опалення і гарячого водопостачання цих підприємств і прилеглих об'єктів. Досвід експлуатації теплоутилізаційних систем з водонагрівальними теплоутилізаторами свідчить, що

вони забезпечують використання близько 30-50 % технічно можливого потенціалу скидної теплоти через здебільшого незначні обсяги та сезонність потреб склоробних підприємств у тепловій енергії у вигляді гарячої води.

В ІТТФ НАН України розроблено також ефективні конструкції повітрянагрівальних теплоутилізаторів, так званих кінцевих рекуператорів КР, які можуть завдяки цілорічному використанню утилізованої теплоти конкурувати з водонагрівальними теплоутилізаторами. Рис. 3,а ілюструє принципову схему використання цього повітрянагрівального устаткування за скловарними печами. Теплообмінна частина рекуператора КР (див. рис. 3, b), у якому реалізується попереднє підігрівання повітря перед надходженням його до регенераторів печі, комплектується із відповідних теплоутилізаторам ТВМ панелей, але з трубами з інтенсифікаторами теплообміну на їхніх внутрішніх поверхнях [8]. Рух теплоносіїв перехресноточковий з проходженням димових газів у міжтрубному просторі, а повітря в трубах, де забезпечується інтенсифікація теплообміну в 1,6-1,9 рази при помірному (порівняно з іншими методами інтенсифікації теплообміну) зростанні аеродинамічного опору.

У разі застосування теплоутилізаційних систем, особливо з повітрянагрівальним устаткуванням, виникає проблема щодо вибору конструкційних матеріалів для теплоутилізаторів. Температура підігріву повітря в металевих рекуператорах обмежена термостійкістю застосовуваних матеріалів. У рекуператорах з нелегованого металу повітря доцільно підігрівати не вище ніж 250 °С. На рис. 4 наведено дані щодо величини економічних показників повітрянагрівального устаткування залежно від кінцевої температури нагрітого повітря.

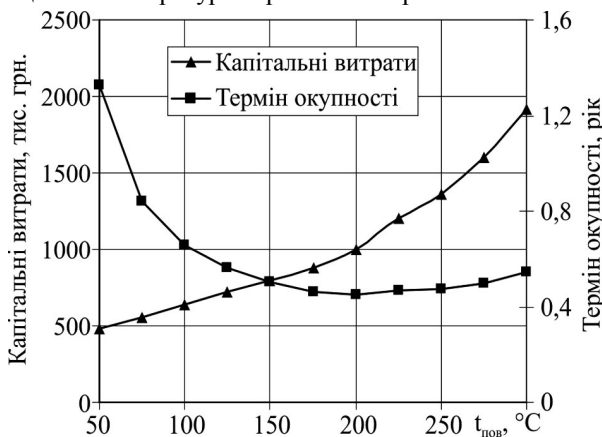




**Рис. 3.** Схема теплоутилізаційної установки (а) з повітрянагрівальним теплоутилізатором (б), призначеним для попереднього підігрівання холодного повітря перед надходженням його до регенераторів печі: 1) теплоутилізатор; 2) димосос; 3) димова труба; 4) вентилятор;  $\rightarrow$   $\rightarrow$  – напрямки потоків повітря і димових газів;  $\leftarrow$  – газохід, повітропровід;  $\equiv$  – шибер / Scheme of heat recovery units with an air-heating exchanger designed to preheat cold air before it enters the furnace regenerators, where: 1) heat exchanger; 2) smoke exhauster; 3) chimney; 4) blower;  $\rightarrow$   $\rightarrow$  – directions of air and exhaust gas flows;  $\leftarrow$  – gas duct, air duct;  $\equiv$  – gate valve

Очевидно, що підвищення рівня підігріву повітря в кінцевому рекуператорі призводить до його здорожчання через збільшення поверхні нагрівання, необхідності зміни схеми руху теплоносіїв (протитоку на прямику) та, зрештою, необхідності виготовлення вхідної частини рекуператора із жаростійких сплавів або кераміки.

Як показали розрахунки, термін окупності витрат на впровадження рекуператора для скловарної печі мінімальний (0,48 року) за нагрівання холодного повітря до 200 °С (див. рис. 4) і не перевищує 0,6 року в інтервалі кінцевих температур нагрітого повітря 110-300 °С.



**Рис. 4.** Економічні показники застосування кінцевого рекуператора КР / Economic indicators of application of the end recuperator ER

Виконано розрахункові дослідження щодо основних характеристик кінцевого рекуператора (див. рис. 3) у разі його використання впродовж року. Результати розрахунків у характерному діапазоні температур навколишнього середовища в цей період подано в табл. 2.

Отримані результати свідчать, що використання рекуператорів дає змогу підвищити ККД печі на 5-9,5 % шляхом охолодження димових газів. Доречно зазначити, що в досліджуваному інтервалі температур у зимовому режимі експлуатації рекуператорів забезпечується вищий рівень охолодження димових газів (їхня мінімальна температура становить близько 290 °С та 360 °С

за температури газів за регенератором 400 та 550 °С відповідно). У літній період температура вихідних димових газів за рівних умов збільшується приблизно на 20-40 °С через зниження ефективності рекуператора та регенератора за підвищення вхідної температури нагрітого повітря.

**Табл. 2.** Технічні характеристики кінцевого рекуператора / Technical data of the end recuperator

Назва характеристики, розмірність	Значення
Теплопродуктивність, кВт	400 – 550
Витрата газів, кг/с	3,4
Температура газів на вході, °С	400 – 550
Температура газів на виході, °С	290 – 400
Витрата повітря, кг/с	3,12
Температура повітря на вході, °С	-20 – 20
Температура повітря на виході, °С	120 – 180
Аеродинамічний опір газового тракту, Па	450
Аеродинамічний опір повітряного тракту, Па	400
Габаритні розміри, мм: ДхШхВ	3000×1700×3300
Маса, кг	4200
Підвищення ККД печі, %	5,0 – 9,5

**Обговорення результатів дослідження.** Використання розроблених водо- та повітрянагрівальних теплоутилізаторів відхідних газів скловарних печей забезпечує підвищення ефективності використання теплоти палива печі на 5-15 %. Порівняно з водонагрівальними теплоутилізаторами ТВМ, що забезпечують підвищення КВТП печі на 7-15 %, кінцеві рекуператори КР мають нижчу теплову ефективність, оскільки максимальний рівень приросту ККД печі становить 9,5 %. Проте для рекуператорів характерний майже вдвічі більший річний термін використання і автономність від зовнішнього споживача утилізованої теплоти.

Визначені в роботі рівні підвищення ефективності використання теплоти палива печі (ККД та КВТП) зі застосуванням розроблених теплоутилізаторів відповідають значенням для інших розробок [1, 2, 3, 5, 6, 8].

Зниження температури запічних газів після теплоутилізації, як вже зазначено, погіршує режими експлуатації димових труб. Наведені в табл. 1, 2 дані щодо

температури вихідних димових газів необхідно врахувати у розрахунку режимів експлуатації димових труб у плані їх антикорозійного захисту та дотримання нормативних показників розсіювання в навколишньому середовищі шкідливих речовин запічних газів. Треба зазначити, що у разі потреби підвищення вихідної температури для забезпечення нормативних екологічних показників димових труб, у запропонованих на рис. 1, 4 схемах передбачено байпасування частини відхідних від регенераторів газів повз теплоутилізатори.

## Висновки / Conclusions

1. Використання розроблених водо- та повітрянагрівальних теплоутилізаторів відхідних газів скловарних печей забезпечує підвищення ефективності використання теплоти палива печі на 5-15 %.
2. Конструкційне виконання теплоутилізаторів дає змогу ефективно очищувати стисненим повітрям його робочі поверхні від відкладень твердого технологічного виносу печей.
3. Застосування в теплоутилізаційних технологіях методу байпасування гарячих запічних газів повз теплоутилізатор дає змогу регулювати обсяги утилізації теплоти, поліпшує умови розсіювання шкідливих викидів у навколишньому середовищі та сприятиме антикорозійному захисту димових труб.

## References

1. Abd Alkarem, Y. M. (2018). A new review in glass furnaces energy saving field by pairing between recuperative and regenera-

tive systems. *International Journal of Advanced Research and Development*, 2(3), 123–129.

2. Burokova, A. V., & Rachmanov, Y. A. (2014). On the question of gas heat recovery heat treatment furnaces metal products. *Scientific Journal NRU ITMO. Series "Economics and Environmental Management"*, 2(1), 71–78. [In Russian].
3. DoE, U. S. (2004). Waste Heat Reduction and Recovery for Improving Furnace Efficiency Productivity and Emissions Performance. *US Department of Energy: Washington, DC, USA*.
4. Fialko, N. M., Stepanova, A. I., & Navrodskaia, R. A. (2016). Efficiency heat exchanger glass furnaces in dusty conditions of heating surfaces. *Energy and Automation*, 2(3), 28–35. [In Russian].
5. Fialko, N. M., Prokopov, V. G., Navrodskaia, R. A., Shevchuk, S. I., & Sliusar, A. F. (2021). Research of the composition of exhaust gases of glass-melting furnaces. *International scientific journal "Internauka"*, 3(6), 72–79. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-6-7297>
6. Gomon, V. I., Ratushniak, A. I., Chernetskiy, V. T., & Khripun, A. F. (1988). Heat recovery of dusty exhaust gases heat of glass furnaces. *Glass and Ceramics*, 1(4), 3–5. [In Russian].
7. Kuznetsov, N. V., Mitor, V. V., & Dubovsky, I. E. (2011). *Thermal calculation of boiler units. Normative method*. Moscow: Ekolite. [In Russian].
8. Pioro, L. S. (1981). *Fuel savings in glass production*. Kyiv: Naukova dumka, 139 p. [In Russian].
9. Tebenkov, B. P. (1975). *Recuperators of industrial furnaces*. Moscow: Metallurgiya, 295 p. [In Russian].
10. Varnashov, V. V., Kiselyov, K. A., & Grebnov, V. S. (2016). A study of operation modes of brick chimneys in operation. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2(1), 56–59. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2016.1.018-026>

**N. M. Fialko, V. H. Prokopov, R. O. Navrodska, S. I. Shevchuk, G. O. Presich**

*Institute of Engineering Thermophysic, NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine*

## SOME FEATURES OF THE HEAT RECOVERY TECHNOLOGIES APPLICATION FOR GAS-FIRED GLASS FURNACES

The paper presents the analysis of the beneficial use features of exhaust gases waste heat of gas-consuming glass furnaces equipped with regenerators for heating combustion air. These features are due to the relatively high temperature of exhaust gases usually ranging from 300 to 650 °C, and the presence of technological entrainment in the form of dust and gas phase from harmful and chemically aggressive compounds such as carbon monoxide, sulfur and nitrogen. These features cause some complications in the implementation of heat recovery technologies for glass furnaces. The results of study on the effectiveness of the developed heat recovery technologies with heat recovery equipment such as heat recovery units for various needs of using the recovered heat are presented. Variants of these technologies are proposed and calculations of the main characteristics of their purpose are performed. In one of the options, modular-type water-heating panel heat exchangers (MWH) are used, which are designed to heat water to meet the needs of plants and adjacent facilities in thermal energy for heating, hot water supply and technological needs. The second option serves for preheating combustion air in the end recuperator (ER) before entering it to furnaces regenerators. In both options of the proposed technologies, it is possible to clean the working surfaces of the heat recovery equipment from deposits of process dust with compressed air. Moreover, experimental data on the high efficiency of this purification obtained during commissioning tests of the corresponding equipment are presented. The comparison of the main indicators of the developed technologies effectiveness has been performed. These technologies provide for anticorrosive protection of chimneys in conditions of cooling flue gases by using the method when part of the hot exhaust gases bypasses the heat recovery exchangers. This method helps to prevent condensation in chimneys and improve their performance in terms of dispersion of harmful substances into the environment. The influence of the final temperature of air heating on the economic indicators of the recuperator is analyzed to determine its rational value. Thus, the research has shown that the use of the proposed technologies for the heat recovery of exhaust gases waste heat of glass furnaces provides an increase in the efficiency of using the furnace fuel by 5 – 15 % with a payback period for their implementation of up to 1 year.

**Keywords:** exhaust gases from glass furnaces; water and air heating heat exchangers; heat recovery efficiency; cleaning work surfaces.