

УДК 504.06, 662.99

ПОКРАЩЕННЯ УМОВ РОЗСІЮВАННЯ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ СКЛОВАРНИХ ПЕЧЕЙ У РАЗІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Фіалко Н.М.¹, Навродська Р.О.², Шевчук С.І.³, Гнєдаш Г.О.⁴

¹член-кореспондент НАН України, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, зав. відділу, професор, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net

²канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, пров. наук. співр., старший науковий співробітник, orcid.org/0000-0001-7476-2962, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

³канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, ст. наук. співр., orcid.org/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com

⁴канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, ст. наук. співр., orcid.org/0000-0003-0395-9615, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2023.11>

Розглянуто шляхи підвищення екологічної ефективності та експлуатаційної надійності словарних печей регенеративного типу за умов використання теплоутилізаційних технологій. Запропоновано для покращення експлуатаційних показників димових труб їхні конструкційні удосконалення та застосування методу байпасування частини димових газів від регенераторів печі повз теплоутилізаційне устаткування. Виконано аналіз ефективності запропонованих заходів для поліпшення розсіювання у приземному шарі шкідливих викидів печей у разі використання водогрійних та повітрогрійних теплоутилізаторів.

Ways of increasing environmental efficiency and operational reliability of regenerative type glass furnaces when using heat-recovery technologies are considered. In order to improve the performance of chimneys, it is proposed to improve their design and use the method of bypassing part of the waste gases from the furnace regenerators past the heat-recovery equipment. An analysis of the effectiveness of the proposed measures to improve the dispersion in the surface layer of harmful emissions from furnaces when using water-heating and air-heating heat exchangers was performed.

Бібл. 14, табл. 3, рис. 2.

Ключові слова: промислові печі, системи теплоутилізації, димові труби, шкідливі викиди, приземна концентрація, екологічна ефективність.

C – концентрація, мг/м³;

k – коефіцієнт зміни концентрацій;

t – температура, °С;

V – об'ємна витрата, м³/с;

Δt – перепад температур, °С;

W – швидкість, м/с;

σ – частка байпасованих газів, %;

Індекси:

гг – гази на виході з гирла димаря;

м, о – метод байпасування та його відсутність відповідно;

нс – навколишнє середовище.

Вступ. Промислові паливоспоживальні печі різного технологічного призначення є дуже енерговитратними установками, в яких реалізуються високотемпературні процеси. Досить часто таке устаткування працює цілодобово, тому актуальною є проблема зменшення в ньому витрат палива та підвищення екологічності його спалювання. Енергозбереження в промислових печах реалізується переважно шляхом застосування таких заходів як оптимізація процесів спалювання палива [1-3], удосконалення конструкцій регенераторів та рекуператорів [2], а також використання систем утилізації теплоти продуктів згорян-

ня після регенераторів та рекуператорів [4, 5]. Застосування енергозберігаючих підходів найчастіше пов'язане зі зменшенням обсягів і температури вихідних димових газів, що може призвести до погіршення режимів експлуатації димових труб щодо розсіювання шкідливих викидів, що містяться в цих газах [6, 7]. Під час виробництва скла характерними шкідливими сполуками у продуктах згоряння є оксиди азоту NO_x, діоксид сірки SO₂ та технологічний пил [8, 9]. Серед цих сполук найшкідливіший вплив на навколишнє середовище (до 80%) спричиняють оксиди азоту (NO_x), а саме монооксид азоту (NO) та його двоокис (NO₂) [8].

Значно скоротити витрати палива на піч регенеративного типу вдається завдяки впровадженню теплоутилізаційних систем [4]. Це реалізується шляхом використання додаткового повітрогрійного устаткування, так званих кінцевих рекуператорів [2], призначених для попереднього нагрівання повітря перед надходженням його до регенераторів, або водогрійного – для нагрівання води систем опалення, гарячого водопостачання та технологічних потреб склоробних підприємств [5]. Під час впровадження такого устаткування забезпечується підвищення коефіцієнта ефективності використання теплоти палива (КВП) печі на $7 \div 10 \%$. Також забезпечується і певний екологічний ефект шляхом зменшення температурного потенціалу газових викидів і зниження в них маси шкідливих речовин завдяки зменшенню витрати палива. Проте екологічна безпека навколишнього середовища внаслідок зміни режимів експлуатації газовідвідних трактів під час застосування теплоутилізаційних технологій, як зазначалося, погіршується.

Метою даного дослідження є покращення режимів експлуатації димових труб газоспоживальних скловарних печей шляхом застосування методів їх екологізації у системах використання скидної теплоти запічних газів.

Методика проведення досліджень. У роботі виконано розрахункові дослідження режимних параметрів газовідвідних каналів технологічних установок варіння скла регенеративного типу під час виробництва тарної продукції та застосуванні систем утилізації теплоти запічних газів. Проведено також аналіз відносної зміни максимальних приземних концентрацій шкідливих викидів цих установок за умов використання запропонованих методів їхньої екологізації та без них. Параметри димових газів після регенераторів приймалися з досвіду експлуатації зазначених печей [7, 9], зокрема і за умов застосування теплоутилізаційних технологій

[5, 9]: температура – $400 \div 450$ °С, витрата газів – 12,3 кг/с. Для скловарних печей характерні високі концентрації шкідливих викидів у продуктах згоряння: NO_x – $800 \div 4000$ мг/м³; SO_3 – $100 \div 1000$ мг/м³; SO_2 – $50 \div 400$ мг/м³; технологічний пил – $200 \div 300$ мг/м³ [8]. Тому зменшення приземних концентрацій цих викидів під час використання теплоутилізаційних технологій є важливим завданням.

У роботі досліджено теплоутилізаційні системи (рис. 1) із застосуванням водо- та повітрогрійних теплоутилізаторів, розроблених авторами [2, 5]. Теплообмінна поверхня водогрійних теплоутилізаторів виконана з пакетів металевих пластин, які утворені трубними каналами з поздовжніми мембранами.

Повітрогрійні теплоутилізатори (кінцеві рекуператори) компонувалися з таких же пластин, але канали утворювалися трубами з кільцевими турбулізаторами на їхній внутрішній поверхні. Нагріваний теплоносій (вода або повітря) рухається у каналах, а грійний теплоносій (димові гази) – у міжтрубному просторі. Для покращення режимних характеристик (температури та швидкості) газів у відповідних газоходах та димових трубах у теплоутилізаційних системах передбачено байпасування частини гарячих газів [10-13] від регенераторів печі повз теплоутилізаційне устаткування. Цей метод дозволяє збільшити у разі потреби температурний потенціал димових газів перед їхнім надходженням до димаря для покращення режиму його експлуатації.

Розглядалися димові труби різного типу (рис. 2). Внутрішні геометричні розміри цих газовідвідних каналів були близькими і відповідали таким, що реально застосовуються. Висоту труби прийнято 55 м.

Внутрішній діаметр гирла металеві та цегляної димових труб дорівнював 3,1 м. Сумарна площа перерізу трьох вставних стволів триствольної труби відповідала площі перерізу основного ствола інших труб, що роз-

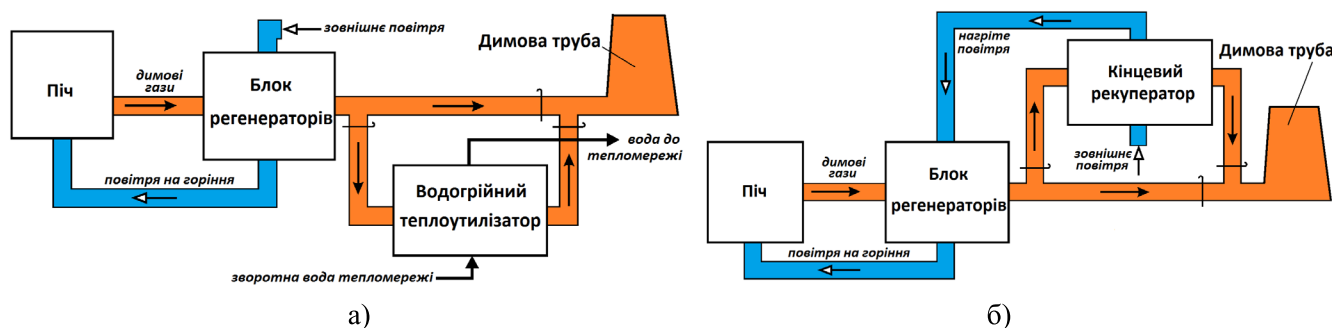


Рис. 1. Схеми систем теплоутилізації скловарних печей регенеративного типу за умов використанні водогрійного теплоутилізатора (а) та кінцевого рекуператора (б)

глядалися. Визначалися температури $t_{\text{гр}}$ та швидкості $W_{\text{гр}}$ газових потоків у їх гирлі для систем теплоутилізації (див. рис. 1) за різних режимів експлуатації водо- і повітрогрійного устаткування протягом року. Основні параметри цих систем для виконання розрахункових досліджень наведено в табл. 1.

У разі байпасування частини запічних газів від регенераторів печі в газохід перед димовою трубою частка σ цієї частини в загальному обсязі суміші змінювалася від 0 до 40 %. Покращення екологічної ефективності скловарних печей у разі застосування методу байпасування визначалося за допомогою коефіцієнта k , що характеризує відносну зміну максимальних приземних концентрацій шкідливих викидів за умов застосування методу (C_m) та без нього (C_o):

$$k = (C_o - C_m) / C_o \cdot 100. \quad (1)$$

Під час розрахунку максимальних приземних концентрацій C_o і C_m відповідно до методичних рекомендацій [14] вираз (1) може бути перетворений до вигляду:

$$k = 1 - \left(\frac{V_{lo} \Delta t_o}{V_{lm} \Delta t_m} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

де V_{lm} и V_{lo} – об'ємні витрати газових викидів;

Δt_m та Δt_o – різниця між температурою виходу цих викидів з гирла димової труби $t_{\text{гр}}$ і температурою повітря навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$ відповідно за умов застосування методу байпасування та без нього.

Як видно, значення вказаної відносної величини k зміни максимальних приземних концентрацій C не залежить від масових концентрацій шкідливих викидів, рельєфу місцевості, температурного градієнта атмосфери, умов виходу газів з газовідвідних каналів в атмосферу та інших умов. Вплив мають лише режимні характеристики димової труби (димаря), які визначаються її типом та умовами охолодження.

Результати досліджень режимних параметрів димових труб різних конструкцій (рис. 2), які визначають умови розсіювання шкідливих викидів скловарних печей протягом року, для системи теплоутилізації із застосуванням повітрогрійного устаткування (кінцевих

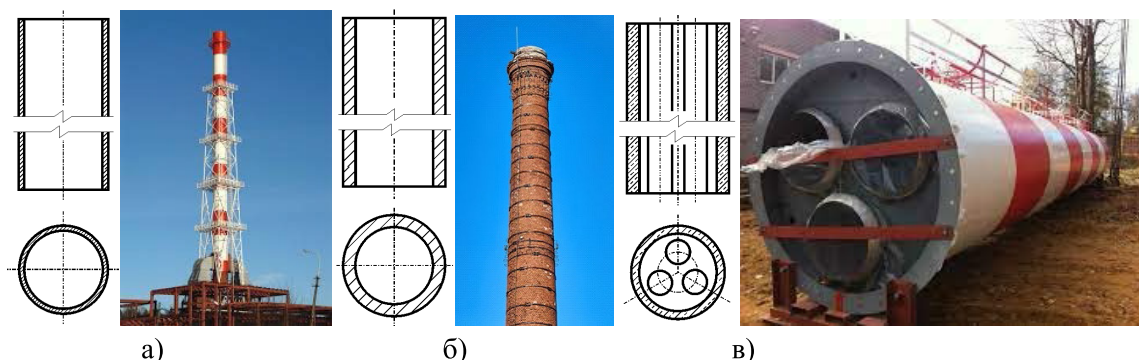


Рис. 2. Фрагменти досліджуваних димових труб:
а) – металева; б) – цегляна; в) - триствольна

Таблиця 1. Вихідні дані

Найменування показника, розмірність	Значення показника
Початкова температура повітря, що нагрівається, °C	-20 ÷ +20
Кінцева температура повітря, що нагрівається, °C	80 ÷ 120
Площа поверхні нагрівання кінцевого рекуператора, м²	480
Витрата повітря, що нагрівається, кг/с	8,95
Початкова температура води, що нагрівається, продовж опалювального періоду при температурі навколишнього середовища від -20 до +10 °C	60 ÷ 35
Кінцева температура води, що нагрівається, °C	62 ÷ 87
Площа поверхні нагрівання водогрійного теплоутилізатора, м²	440
Витрата води, що нагрівається, кг/с	13,9

рекуператорів) та методу байпасування запічних газів від регенераторів печі повз це устаткування (рис. 1.б) наведені у таблиці 2.

Отримані результати свідчать, що тип застосовуваного димаря і температурні показники атмосферного повітря істотно впливають на його режимні характеристики. При цьому чим вище теплоізоляційні властивості оболонки димаря, тим більші значення $t_{\text{гр}}$ та $W_{\text{гр}}$ газових викидів з його гирла. Значення вказаних величин зростають із підвищенням температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$ завдяки зменшенню теплових втрат із поверхні оболонки димаря. Як показують отримані результати, найкращими показниками характеризується триствольна димова труба. Так у ній за умов застосування системи теплоутилізації показники $t_{\text{гр}}$ та $W_{\text{гр}}$ вищі в 1,13 та 1,55 рази відповідно у порівнянні з металевою трубою, що має низькі теплоізоляційні властивості. Більш значне зростання швидкості $W_{\text{гр}}$ порівняно зі зростанням $t_{\text{гр}}$ у димарі пояснюється можливістю зменшення перерізу для проходу газових викидів завдяки зменшенню кількості використовуваних стволів. Отже, конструкційні удосконалення димових труб (установка трьох стволів в одну оболонку) порівняно з традиційними (одноствольними – цегляною та металевою) мають переваги стосовно покращення режимних параметрів цих газовідвідних трактів. Конструкційні зміни димових труб щодо поліпшення умов розсіювання шкідливих викидів у їхньому приземному шарі можуть розглядатися як окремий важливий метод екологізації промислових печей. Зокрема, для традиційних димових каналів для поліпшення їхніх режимних параметрів у разі застосування теплоутилізаційних технологій можна теплоізолювати оболонку каналу. Що стосується застосування методу байпасування в системах теплоутилізації, то він дозволяє поліпшити режими експлуатації всіх розглянутих димових труб. Так в гирлі цих труб температура $t_{\text{гр}}$ та швидкість $W_{\text{гр}}$ вихідних газів зростає при використанні методу і тим більше, чим вища частка байпасування σ та чим кращі теплоізоляційні властивості оболонки газовідвідного каналу. Зокрема, відносне збільшення $t_{\text{гр}}$ становить в 1,13 ÷ 1,16 рази, а швидкості $W_{\text{гр}}$ в 1,05 ÷ 1,09 рази із зміною σ від 0 до 40 %.

Виконано також розрахунки щодо впливу розглянутих методів екологізації для теплоутилізаційних систем з водогрійним теплоутилізаційним устаткуванням (теплоутилізаторами ТВМ) та без нього. Отримані результати подано в таблиці 3. Як видно, для цього варіанта схеми теплоутилізації (рис. 1а) вплив

теплоізоляційних властивостей оболонок димарів має ті ж тенденції, що і для повітрогрійних теплоутилізаторів. Однак, у цьому разі метод байпасування забезпечує більш суттєве збільшення температурного потенціалу та швидкості газового потоку на виході з цих каналів, ніж при використанні повітрогрійного устаткування (рис.1б). Отримані результати досліджень свідчать, що вказаний метод за умов застосування водогрійних теплоутилізаторів забезпечує відносне збільшення $t_{\text{гр}}$ у 1,6 ÷ 1,8 рази, а $W_{\text{гр}}$ у 1,2 ÷ 1,3 рази із зростанням частки σ від 0 до 40 %. Суттєвіший вплив даного методу в цьому разі викликано глибшим охолодженням запічних газів. Це пояснюється високим значенням коефіцієнта тепловіддачі з боку води, а отже і коефіцієнта теплопередачі теплообмінної поверхні теплоутилізатора з використанням теплоносієм води.

На підставі отриманих даних температур $t_{\text{гр}}$ та швидкості $W_{\text{гр}}$ газів у гирлі різних димових труб для двох систем теплоутилізації (рис. 1) за різних режимів експлуатації водо- та повітрогрійного устаткування протягом року виконано розрахунки щодо впливу методу байпасування на зміну максимальної приземної концентрації шкідливих викидів запічних газів.

Результати визначення відносних значень k зменшення максимальних приземних концентрацій під час експлуатації повітрогрійного та водогрійного теплоутилізаційного устаткування наведено на рис. 3. У разі застосування водогрійних теплоутилізаторів розрахункові дослідження виконувалися лише для умов їхнього застосування, тобто в опалювальний сезон.

Як було зазначено, результати стосуються всіх шкідливих викидів скловарних печей, зокрема і найбільш характерних: оксидів сірки SO_2 , азоту NO_x та технологічного пилу, оскільки величина відносного значення зменшення максимальної приземної концентрації k залежить лише від параметрів газових викидів на виході з димових труб. Це температура $t_{\text{гр}}$ і швидкість $W_{\text{гр}}$ (див. формулу 2), які змінюються з варіюванням частки σ байпасування газів.

Для теплоутилізаційних систем з повітрогрійними теплоутилізаторами (рис. 3а, б) отримані дані щодо значення k свідчать про збільшення цієї величини із зростанням частки σ для всіх типів досліджуваних димарів. Так за зміни σ від 0 до 40 % значення k збільшується від 0 до 6,5 %. Результати виконаних розрахункових досліджень також свідчать про несуттєвий вплив на величину k конструкційних особливостей розглянутих димових каналів та температури повітря $t_{\text{нс}}$.

За умови застосування в теплоутилізаційних системах водогрійних теплоутилізаторів (рис. 3в, г) та мето-

Таблиця 2. Результати розрахунків режимних параметрів димових труб у разі застосування повітрогрійного теплоутилізаційного устаткування (ПТУ) та без нього

Найменування режимних параметрів		Частка байпасованих газів σ, %	Значення у режимах роботи									
			з ПТУ	без ПТУ	з ПТУ	без ПТУ	з ПТУ	без ПТУ	з ПТУ	без ПТУ	з ПТУ	без ПТУ
			температура навколишнього середовища, °C									
			-20		-10		0		10		20	
триствольна труба												
Темпе- ратура газів, °C	на вході	0	223	410	232	420	241	430	251	440	261	450
		20	200		247		256		266		275	
		40	248		267		277		286		296	
	у гирлі	0	222	409	232	419	240	429	250	439	260	449
		20	237		246		256		265		274	
		40	257		266		276		285		295	
Швидкість газів у гирлі, м/с		0	3,4	3,1	3,4	3,1	3,5	3,2	3,5	3,2	3,6	3,3
		20	3,5		3,5		3,6		3,6		3,7	
		40	3,7		3,7		3,7		3,8		3,8	
цегляна труба												
Темпе- ратура газів, °C	на вході	0	223	410	232	420	241	430	251	440	261	450
		20	238		247		256		266		275	
		40	258		267		277		286		296	
	у гирлі	0	213	393	223	403	232	413	241	423	251	433
		20	227		237		246		256		265	
		40	247		256		266		275		285	
Швидкість газів у гирлі, м/с		0	2,2	3,0	2,2	3,0	2,3	3,1	2,3	3,1	2,4	3,2
		20	2,3		2,3		2,3		2,4		2,4	
		40	2,3		2,4		2,4		2,5		2,5	
металева труба												
Темпе- ратура газів, °C	на вході	0	223	410	232	420	241	430	251	440	261	450
		20	238		247		256		266		275	
		40	258		267		277		286		296	
	у гирлі	0	196	357	206	367	215	377	224	387	234	397
		20	208		218		228		237		247	
		40	226		236		246		255		265	
Швидкість газів у гирлі, м/с		0	2,1	2,8	2,2	2,9	2,2	2,9	2,2	3,0	2,3	3,0
		20	2,2		2,2		2,3		2,3		2,3	
		40	2,3		2,3		2,3		2,4		2,4	

ду байпасування гарячих газів повз теплоутилізаційне устаткування, отримані дані свідчать про те, що величини відносних значень k зменшення максимальної приземної концентрації викидів у разі застосування цих теплоутилізаторів більші у порівнянні з використанням

повітрогрійних теплоутилізаторів. Так, із зростанням частки σ від 0 до 40 % значення k збільшується від 0 до 30 %. Причому вплив конструкційних особливостей газовідвідних каналів на величину k є помітнішим. Чим вище теплоізоляційні властивості оболонки каналів, тим вищий рівень зростання k .

Таблиця 3. Результати розрахунку режимних параметрів димових труб у разі використання водогрійного теплоутилізаційного устаткування (ВТУ) та без нього

Найменування режимних параметрів		Частка байпасованих газів σ, %	Значення у режимах роботи							
			з ВТУ	без ВТУ	з ВТУ	без ВТУ	з ВТУ	без ВТУ	з ВТУ	без ВТУ
			температура навколишнього середовища, °C							
			-20		-10		0		10	
триствольна труба										
Температура газів, °C	на вході	0	154	410	149	420	143	430	136	440
		20	200		198		195		191	
		40	248		249		249		249	
	у гирлі	0	153	409	148	419	143	429	135	439
		20	200		198		195		191	
		40	247		248		249		248	
Швидкість газів у гирлі, м/с		0	2,8	3,0	2,8	3,1	2,8	3,1	2,7	3,2
		20	3,2		3,1		3,1		3,1	
		40	3,5		3,5		3,5		3,5	
цегляна труба										
Температура газів, °C	на вході	0	154	410	149	420	143	430	136	440
		20	200		198		195		191	
		40	248		249		249		249	
	у гирлі	0	147	393	143	403	138	413	131	423
		20	191		190		188		184	
		40	238		239		239		239	
Швидкість газів у гирлі, м/с		0	1,9	3,0	1,8	3,0	1,8	3,0	1,8	3,1
		20	2,1		2,1		2,0		2,0	
		40	2,3		2,3		2,3		2,3	
металева труба										
Температура газів, °C	на вході	0	154	410	149	420	143	430	136	440
		20	200		198		195		191	
		40	248		249		249		249	
	у гирлі	0	135	356	132	366	128	377	123	387
		20	176		175		174		172	
		40	218		220		221		222	
Швидкість газів у гирлі, м/с		0	1,8	2,8	1,8	2,8	1,8	2,9	1,8	2,9
		20	2,0		2,0		2,0		2,0	
		40	2,2		2,2		2,2		2,2	

Ще більший вплив на відносне значення зменшення приземної концентрації шкідливих викидів k при застосуванні теплового методу байпасування запічних газів для теплоутилізаційних систем з водогрійними теплоутилізаторами має температура опалювального

сезону t_{nc} . Так за зміни t_{nc} від -20 °C до +10 °C значення k зростає у 1,5 рази. Це пояснюється глибшим охолодженням запічних газів для даної системи теплоутилізації із зростанням температури t_{nc} , що відповідає зменшенню температури зворотної тепломережної води, що

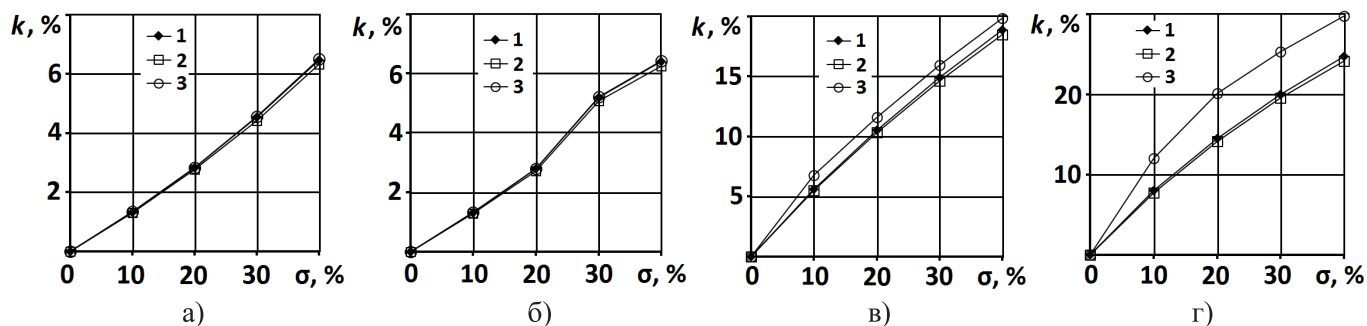


Рис. 3. Залежність відносного значення k зменшення максимальної приземної концентрації шкідливих викидів від частки байпасованих газів σ для теплоутилізаційної системи з повітрогрійними теплоутилізаторами за мінімальної взимку -20°C (а) і максимальної влітку температури $+20^{\circ}\text{C}$ (б) та з водогрійними теплоутилізаторами за мінімальної -20°C (в) і максимальної $+10^{\circ}\text{C}$ (г) температурах опалювального сезону для різних димових труб: 1 – цегляна; 2 – металева; 3 – триствольна

нагрівається в теплоутилізаторі. Відповідно зменшуються значення Δt (див. формулу 2) між температурою газів $t_{\text{гр}}$ в усті труби та температурою повітря навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$.

Вплив типу димаря на значення k для водогрійних теплоутилізаторів також істотніший у порівнянні з повітрогрійними. Різниця між відповідними коефіцієнтами k особливо помітна у теплу (осінньо-весняну) пору періоду опалення. У цю пору значення k для триствольної димової труби в 1,01 і 1,15 рази вище порівняно з цегляною та металевою відповідно. Це також пояснюється глибшим охолодженням димових газів у водогрійних теплоутилізаторах у цей період.

Отже, розглянуті в роботі методи екологізації технологічних установок варіння скла дозволяють суттєво покращити екологічну обстановку у приземному шарі навколо склоробних підприємств.

Висновки. За умов впровадження за скловарними печами систем теплоутилізації з водо- та повітрогрійним устаткуванням, досліджено закономірності зміни режимних параметрів (температури $t_{\text{гр}}$ та швидкості $W_{\text{гр}}$) запічних газів на виході з гирла димових труб різного типу. Визначено, що застосування цих систем погіршує технологічні режими цих димарів через зниження зазначених параметрів. Водночас показано, що системи з повітрогрійними теплоутилізаторами у порівнянні з системами з водогрійним устаткуванням характеризуються вищими значеннями $t_{\text{гр}}$ та $W_{\text{гр}}$ на виході з гирла розглянутих димових каналів.

Встановлено ефекти впливу типу димаря на його режимні параметри. Показано, що чим вище теплоізоляційні властивості оболонки димаря, тим вищі температура $t_{\text{гр}}$ і швидкість $W_{\text{гр}}$ газових викидів на

виході з гирла. Встановлено також, що конструкційно удосконалені димарі (триствольні труби) порівняно з традиційними (одностовольними цегляною і металевою) мають переваги щодо покращення вказаних параметрів.

Виконано аналіз ефективності застосування методу байпасування запічних газів повз теплоутилізаційне устаткування для поліпшення експлуатаційних режимів димарів. Встановлено, що цей метод забезпечує в гирлі цих каналів відносне збільшення температури газів у 1,13 ÷ 1,16 рази, а їхньої швидкості у 1,05 ÷ 1,09 рази із зростанням частки σ від 0 до 40 % для систем з повітрогрійними теплоутилізаторами та у 1,6 ÷ 1,8 та 1,2 ÷ 1,3 рази відповідно за умов застосування водогрійного теплоутилізаційного устаткування.

Отримано дані щодо відносного зменшення k приземної концентрації шкідливих викидів скловарних печей із застосуванням методу байпасування. Показано, що ефективність впливу цього методу вища для теплоутилізаційних систем з водогрійними теплоутилізаторами. Так при зростанні частки байпасування газів σ від 0 до 40 % значення k збільшуються до 6,5 % для теплоутилізаційних систем з повітрогрійними теплоутилізаторами та до 30 % при використанні водогрійного устаткування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Diop, M. A., Chen, X., Hassan, M. I. (2017). Billets heat treatment using flue gas for energy efficiency and batching cycle time reduction. Energy Proc 105:377–3383. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.763>.

2. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Гнедаш Г. О., Пресіч Г. О. (2022). Оптимізація конструкційних характеристик кінцевого рекуператора для скловарних печей. *International Scientific Journal "Internauka"*, (14). <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-14-8403>.
3. Єрофєєва, А. А. (2020). 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), 166.
4. Фіалко, Н.М., Навродская, Р.А., Степанова, А.И. Шеренковский, Ю.В., & Сарюгло, А.Г. (2016). Утилизация теплоты отходящих газов стекловаренных печей с использованием мембранных труб. Киев: «София А. ISBN 978-966-02-7982-7.
5. Фіалко, Н. М., Прокопов, В. Г., Навродська, Р. О., Шевчук, С. І., & Пресіч, Г. О. (2021). Особливості застосування теплоутилізаційних технологій для газоспоживальних скловарних печей. *Науковий вісник НЛТУ України*, 31(4), 109-113. <https://doi.org/10.36930/40310418>.
6. Карп, І. М., П'яних, К. Є., & Лисенко, А. А. (2013). Энергозберігаючі технології технічного переоснащення технологічних печей машинобудівних заводів на основі глибокої утилізації вторинної теплоти та зменшення теплових втрат. *Наука та інновації*, 9(3), 39-45. <https://doi.org/10.15407/scin9.03.039>.
7. Bauer, T., Forbes, I., Penlington, R., & Pearsall, N. (2003, January). The potential of thermophotovoltaic heat recovery for the glass industry. In *AIP conference proceedings* (Vol. 653, No. 1, pp. 101-110). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.1539368>.
8. Экологические проблемы производства стеклотары. [Электронный ресурс]. <https://msd.com.ua/sovremennoe-steklotarnoe-proizvodstvo/ekologicheskie-problemy-proizvodstva-stekltary/>
9. Фіалко, Н.М., Прокопов, В.Г., Навродская, Р.А., Шевчук, С.И., & Слюсар А.Ф. (2021). Исследование состава дымовых газов стекловаренных печей. *Международный научный журнал «Интернаука»*. 6(106). <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-6-7297>.
10. Фіалко, Н., Навродская, Р., Шевчук, С., Пресич, Г., Гнедаш, Г., & Глушак, О. (2014). Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок с глубоким охлаждением дымовых газов. *Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies*, 5(2), 13–17. <https://chiffa.org/JournalEngine/engine/index.php/msj/article/view/439>.
11. Fialko, N., Navrodska, R., Shevchuk, S., Presich, G., & Gnedash, G. (2019). The use of thermal methods to protect the exhaust-channels of boilers equipped with heat-recovery units. *International scientific journal "Internauka"*, 11(73), 14-16. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-11>.
12. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Пресіч Г. О., Гнедаш Г. О., Шевчук С. І. (2020). Застосування повітряного методу захисту димових труб котельних установок в системах теплоутилізації. *International Scientific Journal "Internauka"*, 4(84), 84-87. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2020-4>.
13. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Гнедаш Г. О., Сбродова Г. О. (2018). Застосування повітряного методу запобігання конденсатоутворенню в газовідвідних трактах котелень. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(10), 76-80. <https://doi.org/10.15421/40281016>.
14. Северин, Л. І., Петрук, В. Г., Безвозюк, І. І., & Васильківський, І. В. (2012). Природоохоронні технології. Частина 1. Захист атмосфери. URL: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/213/389/428-1?inline=1>

IMPROVEMENT OF THE CONDITIONS OF DISPERSAL OF HARMFUL EMISSIONS FROM GLASS FURNACES IN CASE USING HEAT-RECOVERY TECHNOLOGIES

Fialko N.M.¹, Navrodska R.², Shevchuk S.³, Gnedash G.⁴

¹Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Head of Department, Professor, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, Senior Research Scientist, orcid.org/0000-0001-7476-2962, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

³PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Researcher, orcid.org/0000-0002-0430-7144, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com

⁴PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Researcher, orcid.org/0000-0003-0395-9615, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2023.11>

The purpose of this study is to improve the operating modes of chimneys of gas-burning glass melting furnaces by applying the methods of their ecologization in systems for using the waste heat of furnace gases.

Known methods of thermal calculation of heat-exchangers and chimneys and methods for dispersing harmful emissions from thermal power plants in the environment were used. For the first time, the effectiveness of the proposed methods of greening to improve the conditions for dispersing harmful emissions from gas-burning glass melting furnaces in the environment under the conditions of using heat-recovery technologies has been studied. The results obtained will be used in the development of energy-efficient gas-burning thermal installations for technological purposes.

Computational studies have been carried out to improve the safety of operation of chimneys of regenerative-type glass melting furnaces by using technologies for recovering the waste heat of furnace gases using water and air-heating heat-exchangers and chimneys of various designs.

The influence of structural features of chimneys on their operating modes by using heat-recovery technologies with water and air-heating heat-exchangers is studied.

It is proposed to increase the environmental efficiency and operational reliability of chimneys by using the thermal method of bypassing a part of waste gases exhausted from regenerators past the heat-recovery equipment in heat-recovery technologies. An analysis of the effectiveness of this method to improve the ground-level concentrations of harmful emissions from furnaces by using the proposed heat-recovery systems was carried out. This method is more efficient for heat-recovery systems with water heat-recovery exchangers, is shown. Thus, with an increase in the share of waste-gas bypass from 0 to 40 %, the values of the coefficient showing the relative change in the maximum surface concentrations of harmful emissions increase to 6.5 % for heat-recovery systems with air-heating heat-exchangers and up to 30% by using water-heating heat-exchangers.

References 14, tables 3, figures 3.

Key words: industrial furnaces, heat-recovery systems, chimneys, harmful emissions, ground-level concentration, environmental efficiency.

1. Diop, M. A., Chen, X., Hassan, M. I. (2017). Billets heat treatment using flue gas for energy efficiency and batching cycle time reduction. *Energy Proc* 105:377–3383. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.763>.

2. Fialko, N. M., Navrodska, R. O., Shevchuk, S. I., Gnedash, G. O., & Presich, G. O. (2022). Optymizatsiya konstruktivnykh kharakterystyk kintsevoho rekuperatora dlya sklovarynykh pechey [Optimization of the design characteristics of the terminal recuperator for glass melting furnaces]. *International Scientific Journal "Internauka"*, (14). <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-14-8403>. (in Ukr.)

3. Yerofieieva, A. A. (2020). Pidvyshchennya efektyvnosti spozhyvannya pryrodnoho hazu promyslovymy kamernymy pechamy [Improving the efficiency of natural gas consumption by industrial chamber furnaces]. «Stalyy rozvytok: zakhyst navkolyshn'oho seredovyshcha. Enerhooshchadnist'. Zbalansovane pryrodokorystuvannya»: zbirnyk materialiv 6-ho mizhnarodnoho konhresu, L'viv: Zakhidno-Ukrayins'kyi Konsal'tynh Tsent (ZUKTS), 166. (in Ukr.)

4. Fialko, N., Navrodska, R., Sherenkovsky, Ju., Stepanova, A., Sarioglo, A. (2016). Utilizatsiya teploty otkhodyashchikh gazov steklovarenykh pechey s ispol'zovaniyem membrannykh trub [Waste gas heat recovery from glass furnaces using membrane tubes]. K: «Sophia-A». ISBN 978-966-02-7982-7. (In Rus.)

5. Fialko, N. M., Prokopov, V. H., Navrodska, R. O., Shevchuk, S. I., & Presich, G. O. (2021). Osoblyvosti zastosuvannya teploutylizatsiynykh tekhnolohiy dlya hazospozhyval'nykh sklovarynykh pechey [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>. (in Ukr.)

6. Karp, I. N., Pyanykh, K. E., Lysenko, A. A. (2013). Enerhozberihayuchi tekhnolohiyi tekhnichnoho pereosnashchennya tekhnolohichnykh pechey mashynobudivnykh zavodiv na osnovi hlybokoyi utylizatsiyi vtorynnoyi teploty ta zmenshennya teplovykh vtrat [Energy-Saving Technologies Based on a Thorough Utilization of Secondary Heat and Heat Loss Reduce]. *Science and innovation*, 9(3), 39-45. <https://doi.org/10.15407/scin9.03.039>. (In Ukr.)
7. Bauer, T., Forbes, I., Penlington, R., & Pearsall, N. (2003, January). The potential of thermophotovoltaic heat recovery for the glass industry. In *AIP conference proceedings* (Vol. 653, No. 1, pp. 101-110). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.1539368>.
8. *Ekologicheskije problemy proizvodstva steklotary*. [Ecological problems of glass container production] (Electronic resource). Retrieved from <https://msd.com.ua/sovremennoe-steklotarnoe-proizvodstvo/ekologicheskije-problemy-proizvodstva-steklotary/>. (In Rus.)
9. Fialko, N. M., Prokopov, V. H., Navrodskaia, R. A., Shevchuk, S. I., & Sliusar, A. F. (2021). Issledovaniye sostava dymovykh gazov steklovarenykh pechey [Research of the composition of exhaust gases of glass-melting furnaces]. *International Scientific Journal "Internauka"*, 6(106). <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-6-7297>. (in Rus.)
10. Fialko, N., Presich, G., Gnedash, G., Shevchuk, S., Navrodskaia, R., & Glushak, O. (2014). Teplovyye metody zashchity gazoovodyashchikh traktov kotel'nykh ustanovok s glubokim okhlazhdeniyem dymovykh gazov. [Thermal methods of protection of gas exhaust tracts of boiler plants with deep cooling of flue gases]. *Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies*, 5(2), 13-17. <https://chiffa.org/JournalEngine/engine/index.php/msj/article/view/439>. (In Rus.)
11. Fialko, N., Navrodska, R., Shevchuk, S., Presich, G., & Gnedash, G. (2019). The use of thermal methods to protect the exhaust-channels of boilers equipped with heat-recovery units. *International scientific journal "Internauka"*, 11(73), 14-16. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-11>.
12. Fialko, N. M., Navrodska, R. O., Presich, G. A., Gnedash, G. A., & Shevchuk, S. I. (2020). Zastosuvannya povitryanoho metodu zakhystu dymovykh trub kotel'nykh ustanovok v systemakh teploutylizatsiyi [Application of an air method for protecting chimneys of boiler plants in heat recovery systems]. *International Scientific Journal "Internauka"*, 4(84), 84-87. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2020-4>. (in Ukr.)
13. Fialko, N. M., Navrodska, R. O., Shevchuk, S. I., Gnedash, G. O., & Sbrodova, G. O. (2018). Zastosuvannya povitryanoho metodu zapobihannya kondensatoutvorennyu v hazovidvidnykh traktakh ko-telen'. [Applying the air methods to prevent condensation in gas exhaust ducts of the boiler plants]. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(10), 76-80. <https://doi.org/10.15421/40281016>. (in Ukr.)
14. Severyn, L. I., Petruk, V. G., Bezvoziuk, I. I., & Vasylykivskyi, I. V. (2012). Pryrodookhoronni tekhnolohiyi. Chastyna 1. Zakhyst atmosfery. [Environmental protection technologies. Part 1. Protection of the atmosphere.] URL: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/213/389/428-1?inline=1>. (in Ukr.)

Отримано 30.05.2023
Received 30.05.2023

Прийнято до друку 15.08.2023
Accepted for publication 15.08.2023