

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*

**ПОЛІПШЕННЯ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДИМОВИХ ТРУБ  
ПРОМИСЛОВИХ ПЕЧЕЙ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТИПУ З  
ПОВІТРОГРІЙНИМИ ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРАМИ  
ENVIRONMENTAL AND RELIABILITY IMPROVEMENT OF GLASS  
FURNACES WITH AIR-HEATING HEAT-RECOVERY UNITS**

**Анотація:** Запропоновано у разі використання для скловарних печей теплоутилізаційних технологій з повітрогрійним устаткуванням застосування методу байпасування частини відхідних від регенераторів печі димових газів повз це устаткування з метою підвищення екологічної ефективності та експлуатаційної надійності димових труб. Виконано аналіз ефективності даного методу для покращення показників розсіювання шкідливих викидів печей у приземному шарі.

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

**Summary:** In order to increase the environmental efficiency and operational reliability of the chimneys in the case of applying heat-recovery technologies with air-heating equipment for glass furnaces, to use the method of bypassing part of the waste gases from the furnace regenerators past this equipment is proposed. The analysis of the effectiveness of this method was performed to improve the indicators of dispersion of harmful emissions from furnaces in the surface layer.

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

Сучасні тенденції стосовно використання газоспоживальних скловарних печей пов'язані з вимогами заощадження палива в цих установках, тобто підвищення їхнього ККД чи коефіцієнта використання теплоти палива КВТП, що зазвичай реалізується шляхом впровадження різноманітних теплоутилізаційних технологій. Застосування вказаних технологій досить часто викликає відхилення від умов нормативної експлуатації димових труб. Ці відхилення мають як позитивні наслідки (зменшення температури та обсягів шкідливих викидів) так і негативні – порушення режимів роботи димових труб щодо розсіювання забруднювальних речовин та безпеки експлуатації цих труб.

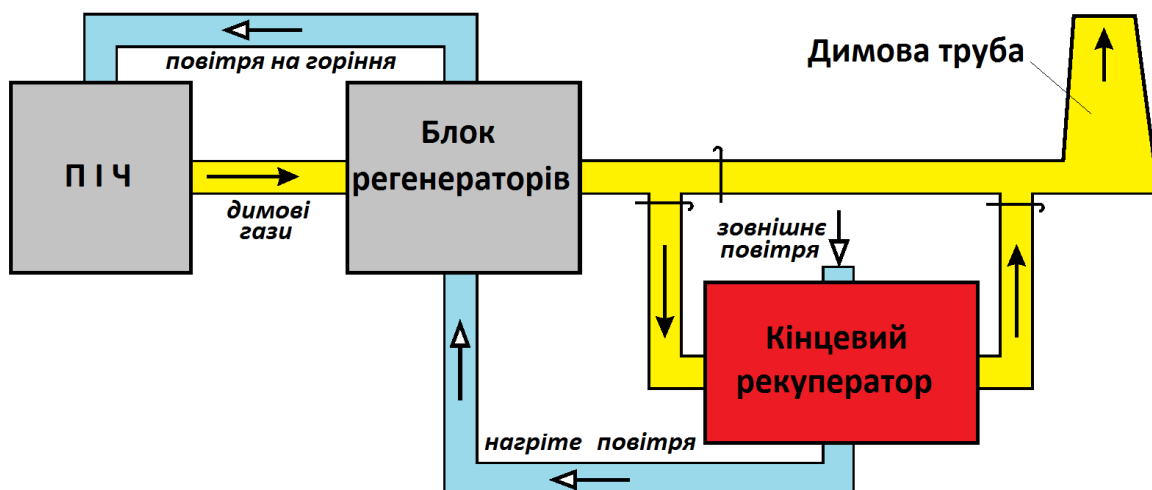
Традиційно для утилізації теплоти запічних газів використовувалось водогрійне теплоутилізаційне устаткування [1-5]. Власний досвід впровадження та експлуатації зокрема за скловарними печами теплоутилізаційних систем з водогрійними теплоутилізаторами вказує, що вони забезпечують використання приблизно 30 % технічно можливого потенціалу скидної теплоти промислових печей через здебільшого незначні обсяги та сезонність потреб склоробних підприємств у тепловій енергії у вигляді гарячої води.

Використання скидної теплоти відхідних газів скловарних печей для попереднього нагрівання повітря перед надходженням його до регенераторів печей дотепер майже не застосовувалось через значні габарити та вартість повітрогійного устаткування. Однак, через високу вартість палива та енергозберезувальні тенденції останнім часом розроблено ефективні конструкції повітрогійних теплоутилізаторів, так званих кінцевих рекуператорів, які можуть завдяки цілорічному використанню конкурувати з водогрійними теплоутилізаторами [6]. Експлуатація повітрогійних теплоутилізаторів має свої особливості щодо режимів експлуатації димових труб скловарних печей, а отже і свої специфічні умови щодо розсіювання шкідливих викидів [6-8].

У роботі [1] авторами для покращення показників розсіювання шкідливих викидів у приземному шарі димових труб скловарних печей запропоновано метод байпасування частини димових газів від регенераторів печі повз теплоутилізаційне устаткування та показано ефективність цього методу за умов використання водогрійного теплоутилізаційного устаткування. Завданням цієї статті є виконання відповідних досліджень стосовно використання для скловарних печей теплоутилізаторів для нагрівання повітря.

Метою роботи є визначення показників екологічності та надійності димових труб газоспоживальних скловарних печей за умов застосування повітрогрійних теплоутилізаційних систем та виконання порівняльного аналізу з даними для водогрійних теплоутилізаторів.

На рис.1 наведено розглянуту схему печі з повітрогрійним теплоутилізатором – кінцевим рекуператором, призначеним для попереднього нагрівання холодного повітря перед надходженням його до регенераторів. Основні параметри кінцевого рекуператора для виконання розрахункових досліджень наведено в табл. 1.



**Рис. 1. Схема системи теплоутилізації скловарної печі регенеративного типу з використанням кінцевого рекуператора**

**Вихідні дані**

Найменування показника, розмірність	Значення показника
Початкова температура повітря, що нагрівається, °С	-20 ÷ +20
Кінцева температура повітря, що нагрівається, °С	80 ÷ 120
Площа поверхні нагрівання кінцевого рекуператора, м <sup>2</sup>	480
Витрата повітря, що нагрівається, кг/с	8,95

Параметри димових газів після регенераторів прийнято відповідно [1]: температура – 410 ÷ 440 °С, витрата газів – 12,0 кг/с. Концентрації шкідливих речовин у продуктах згоряння [1; 8]: NO<sub>x</sub> – 1300 мг/м<sup>3</sup>; SO<sub>2</sub> – 1150 мг/м<sup>3</sup>; технологічний пил – 300 мг/м<sup>3</sup>.

Основними розрахунковими параметрами для досліджень режимів експлуатації димових труб протягом року були температура  $t_{г}^{гир}$  та швидкість  $W_{г}^{гир}$  газових потоків у гирлі димової труби різного типу (металева, цегляна, залізобетонна та триствольна). Для всіх типів труб прийнято: висота труби 55 м, а внутрішній діаметр гирла 3,1 м.

Отримані результати показують, що як і у разі застосування водогрійних теплоутилізаторів, за умов використання повітрогрійних значення температури  $t_{г}^{гир}$  та швидкості  $W_{г}^{гир}$  зменшуються у порівнянні з проектними значеннями без теплоутилізації. Отримані результати також вказують на те, що чим вище теплоізоляційні властивості оболонки димової труби, тим вище значення  $t_{г}^{гир}$  та  $W_{г}^{гир}$  газових викидів з її гирла.

Результати досліджень свідчать, що метод байпасування дозволяє поліпшити режими експлуатації всіх розглянутих димових труб. Так в гирлі цих труб  $t_{г}^{гир}$  та  $W_{г}^{гир}$  зростає якщо метод використовується, і значення цих параметрів тим більше, чим вище частка байпасування  $\sigma$  та чим кращі теплоізоляційні властивості оболонки труби. Так зі зміною  $\sigma$  від 0 до 40 % відносне збільшення  $t_{г}^{гир}$  становить в 1,13 ÷ 1,16 рази, а  $W_{г}^{гир}$  в 1,05 ÷ 1,09 рази. Ці показники є меншими у порівнянні з відповідними для водогрійних теплоутилізаторів, що пояснюється глибшим охолодженням

запічних газів у водогрійному устаткуванні через високе значенням коефіцієнта тепловіддачі з боку води, а отже і коефіцієнта теплопередачі теплообмінної поверхні.

Покращення екологічності склованих печей у разі застосування методу байпасування [9-13] визначалося як і в роботі [1]. А саме визначенню підлягали показники приземної концентрації  $C_m$  та коефіцієнта  $k$ , який показує відносну зміну максимальних приземних концентрацій шкідливих речовин у разі застосування методу ( $C_m$ ) та без нього ( $C_0$ ):

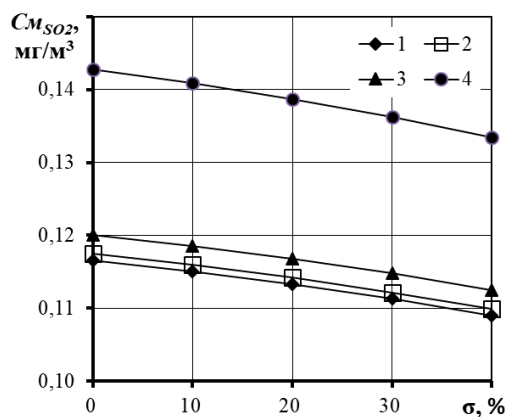
$$k = (C_0 - C_m) / C_0 \cdot 100.$$

Результати розрахункових досліджень приземної концентрації характерних шкідливих викидів запічних газів для різних димових труб при використанні теплоутилізаційних систем з повітрогрійними теплоутилізаторами (кінцевими рекуператорами) протягом року в залежності від часток байпасування  $\sigma$  гарячих газів повз кінцевий рекуператор наведено на рис. 2. Як видно з наведених даних, значення максимальних приземних концентрацій  $C_m$  суттєво залежать від типу застосованої димової труби. Найнижчі значення  $C_m$  відповідають димовим трубам з кращими теплоізоляційними властивостями, більшій частці  $\sigma$  байпасування гарячих газів від регенераторів печі та вищій температурі навколишнього середовища. Отримані дані свідчать також, що при збільшенні частки байпасованих газів  $\sigma$  від 0 до 40 % значення максимальної приземної концентрації  $C_m$  зменшується в межах 5 ÷ 7 % для викидів оксиду сірки та оксидів азоту і 13 ÷ 15 % для пилу. І зокрема, чим кращі теплоізоляційні властивості оболонки димової труби, тим менші значення  $C_m$ .

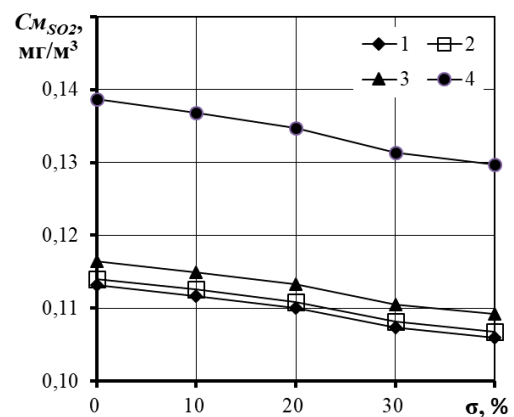
Що стосується впливу температури навколишнього середовища  $t_{nc}$  на значення максимальної приземної концентрації  $C_m$  шкідливих викидів, то вона має менший вплив, на значення  $C_m$ , ніж величина частки

байпасування  $\sigma$ . Так, при підвищенні  $t_{nc}$  від  $-20$  до  $+20$  °C спостерігається зменшення величин  $C_M$  лише на  $1 \div 3$  %.

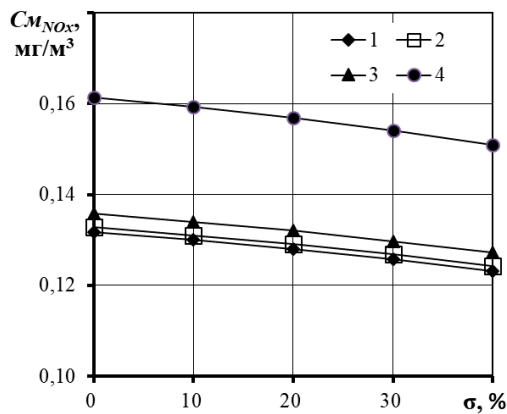
Слід відмітити, що рівні концентрацій усіх шкідливих викидів  $C_M$  є вищими для теплоутилізаційних систем з водогрійним устаткуванням [1], що пояснюється глибшим охолодженням запічних газів в даних системах. За цих умов застосування методу байпасування за тих же часток  $\sigma$  є більш ефективним ніж при використанні повітрогрійних теплоутилізаторів.



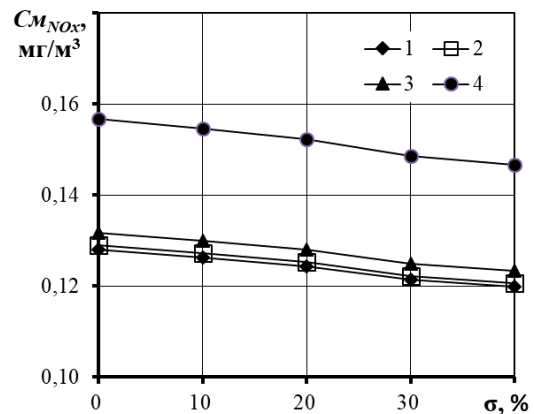
а)



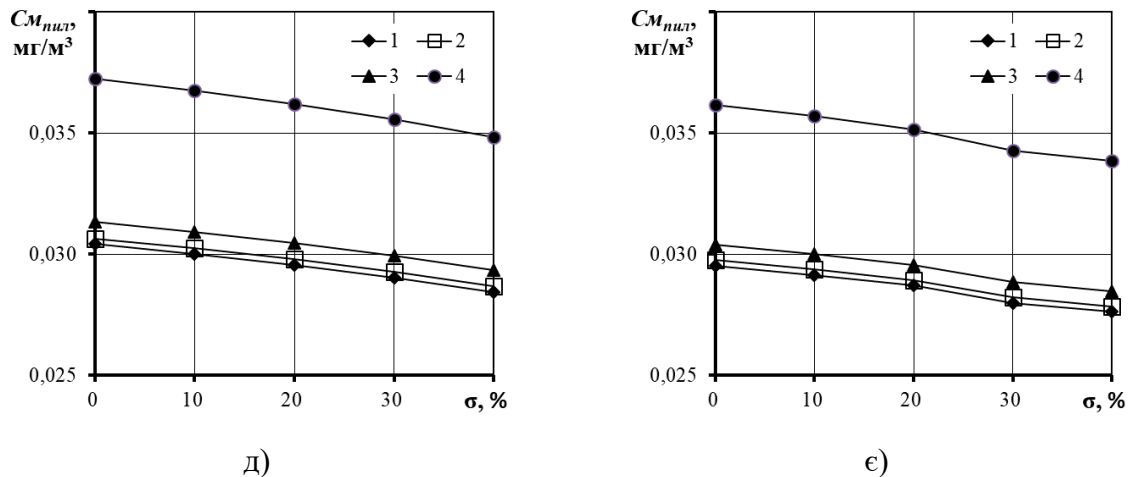
б)



в)



г)

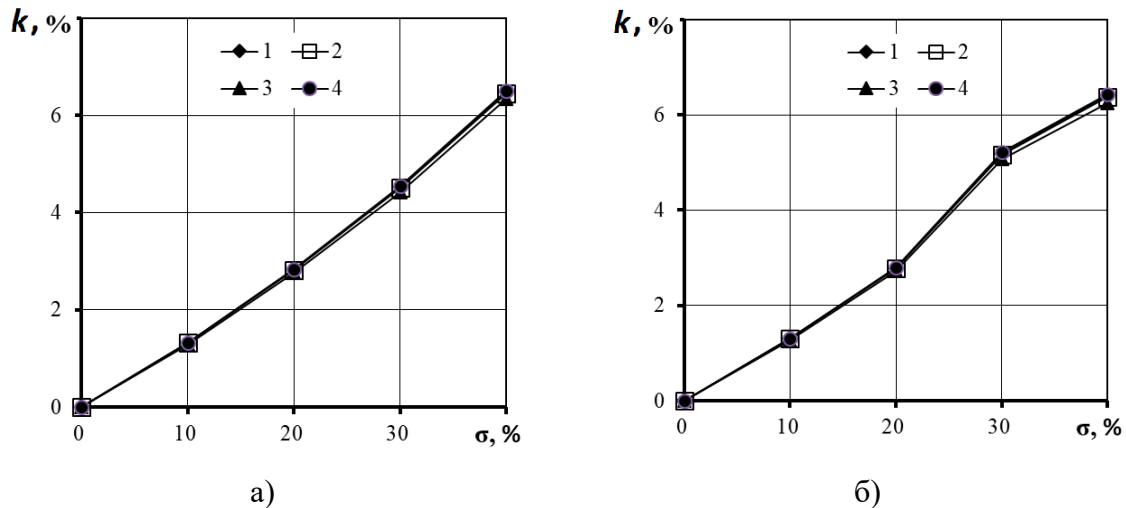


**Рис. 2.** Залежність максимальної приземної концентрації викидів  $C_M$  двоокису сірки (а, б), оксидів азоту (в, г) та викидів пилу (д, е) від частки байпасування  $\sigma$  для різних конструкцій димових труб при мінімальній температурі  $-20^{\circ}\text{C}$  (а, в, д) та максимальній  $+20^{\circ}\text{C}$  (б, г, е) за умов експлуатації повітрогрійних теплоутилізаторів: 1 – цегляна; 2 – бетонна; 3 – металева; 4 – триствольна труби

Також відмінним для теплоутилізаційних систем з водогрійними теплоутилізаторами у порівнянні із використанням повітрогрійних є вплив температури навколишнього середовища  $t_{\text{nc}}$  на рівні зменшення приземних концентрацій  $C_M$  для усіх розглянутих видів забруднення атмосфери. Отримані дані свідчать, що з підвищенням температури навколишнього середовища  $t_{\text{nc}}$  значення максимальних приземних концентрацій  $C_M$  розглянутих шкідливих викидів для водогрійних теплоутилізаторів зростають на  $9 \div 19\%$ . Це також пояснюється поглибленим охолодженням димових газів з підвищенням температури  $t_{\text{nc}}$ , що відповідає зниженню температури нагріваної води.

Результати розрахунків щодо впливу методу байпасування на зміну коефіцієнта  $k$ , що характеризує зміну максимальної приземної концентрації шкідливих викидів запічних газів у разі використання методу байпасування наведено на рис. 3.





**Рис. 3. Залежність відносного значення  $k$  зменшення максимальної приземної концентрації шкідливих викидів від частки байпасованих газів  $\sigma$  для теплоутилізаційної системи з кінцевими рекуператорами за мінімальної взимку - 20°C (а) і максимальній влітку +20°C температурах (б) для різних типів димових труб: 1 – цегляна; 2 – бетонна; 3 – металева; 4 – триствольна труби**

Отримані дані щодо значення  $k$  свідчать про збільшення цієї величини зі зростанням частки байпасування газів для всіх типів досліджуваних димових труб. Зі зміною  $\sigma$  від 0 до 40 % значення  $k$  збільшується від 0 до 6,5 %. Як видно, результати також свідчать про несуттєвий вплив конструкційних особливостей димових труб та температури  $t_{\text{НС}}$  повітря зовнішнього середовища на величину  $k$ .

За результатами виконаних досліджень можна зробити висновок, що нижчі значення максимальної приземної концентрації  $C_m$  та коефіцієнта відносного зменшення  $k$  приземних концентрації розглянутих шкідливих викидів у навколишньому середовищі відповідають теплоутилізаційним системам з повітрогрійними теплоутилізаторами, димовим трубам з кращими теплоізоляційними властивостями, більшій частці  $\sigma$  байпасування гарячих газів від регенераторів печі повз теплоутилізаційне устаткування та вищій температурі навколишнього середовища.

Також слід відмітити, що значення  $k$  при застосуванні повітрогрійних теплоутилізаторів менші у порівнянні із використанням водогрійних теплоутилізаторів, тобто ефективність впливу методу байпасування газів є

вищою для теплоутилізаційних систем з водогрійними теплоутилізаторами.

### Література

1. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Гнедаш Г. О. Покращення екологічності та надійності скловарних печей з водогрійними теплоутилізаторами // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". 2023. № 11. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2023-11-8973>
2. Утилизация теплоты отходящих газов стекловаренных печей с использованием мембранных труб [Текст] : [монографія] / Н. М. Фиалко [и др.]. Киев : София-А, 2016. 214 с. ISBN 978-966-02-7982-7
3. Фіалко Н. М., Прокопов В. Г., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Пресіч Г. О. Аналіз екологічної ефективності димових труб котелень за умов застосування теплоутилізаційних технологій. Науковий вісник НЛТУ України. 2020. 30(4). С. 104-108. doi: <https://doi.org/10.36930/40300418>
4. Фиалко Н. М., Степанова А. И., Навродская Р. А. Эффективность теплоутилизаторов стекловаренных печей в условиях запыленности поверхностей нагрева. Энергетика і автоматика. 2016. № 3. С. 28-35.
5. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Навродська Р.О., Шевчук С.І., Степанова А.І. Результати експериментальних досліджень теплотехнічних характеристик водогрійних теплоутилізаторів промислових печей. Теплофізика та теплоенергетика. 2022. 44(1). Р. 84-91. doi: <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2022.10>
6. 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. 31(4). С. 109-113. doi: <https://doi.org/10.36930/40310418>

7. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Гнедаш Г. О., Пресіч Г. О. Оптимізація конструкційних характеристик кінцевого рекуператора для скловарних печей // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". 2022. 14. С. 45-49. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-14-8403>
8. Фиалко Н. М., Прокопов В. Г., Навродская Р. А., Шевчук С. И., Слюсар А. Ф. Исследование состава дымовых газов стекловаренных печей // Международный научный журнал "Интернаука". 2021. № 6. С. 49-53. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-6-7297>
9. Fialko N., Navrodska R., Shevchuk S., Presich G., Gnedash G. The use of thermal methods to protect the exhaust-channels of boilers equipped with heat-recovery units. International scientific journal "Internauka". 2019. № 11(73). P. 14-16.
10. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Пресіч Г. О., Гнедаш Г. О., Шевчук С. І. Застосування повітряного методу захисту димових труб котельних установок в системах теплоутилізації // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". 2020. 4(84). P. 84-87.
11. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Гнедаш Г. О., Сбродова Г. О. Застосування повітряного методу запобігання конденсатоутворенню в газовідвідних трактах котелень. Науковий вісник НЛТУ України. 2018. № 28(10). С. 76-80. doi: <https://doi.org/10.15421/40281016>
12. Fialko N., Navrodska R., Gnedash G., Presich G., Shevchuk S. Methods for protecting boiler chimneys against corrosion due to fall-out condensate from flue gases. International scientific journal "Internauka". 2021. № 9(109). P. 30-32. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-9-7426>
13. Fialko N., Navrodska R., Gnedash G., Shevchuk S., Novakivskii M. Effectiveness of the air method protection of gas exhaust channels of boiler plants with complex recovery of the waste gases heat. International

scientific journal “Internauka”. 2023. № 7(141). P. 46-49. doi:  
<https://doi.org/10.25313/2520-2057-2023-7-8790>