

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*

**ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ  
СКЛОВАРНИХ ПЕЧЕЙ З ВОДОГРІЙНИМИ  
ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРАМИ  
ENVIRONMENTAL AND RELIABILITY IMPROVEMENT OF GLASS  
FURNACES WITH WATER-HEATING HEAT-RECOVERY UNITS**

***Анотація.** Запропоновано для покращення екологічності газоспоживальних скловарних печей регенеративного типу та підвищення експлуатаційної надійності їхніх димових труб за умов використання теплоутилізаційних технологій застосування методу байпасування частини димових газів від регенераторів печі повз теплоутилізаційне устаткування. Виконано аналіз ефективності даного методу для покращення показників розсіювання шкідливих викидів у приземному шарі за умов використання водогрійного теплоутилізаційного устаткування.*

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

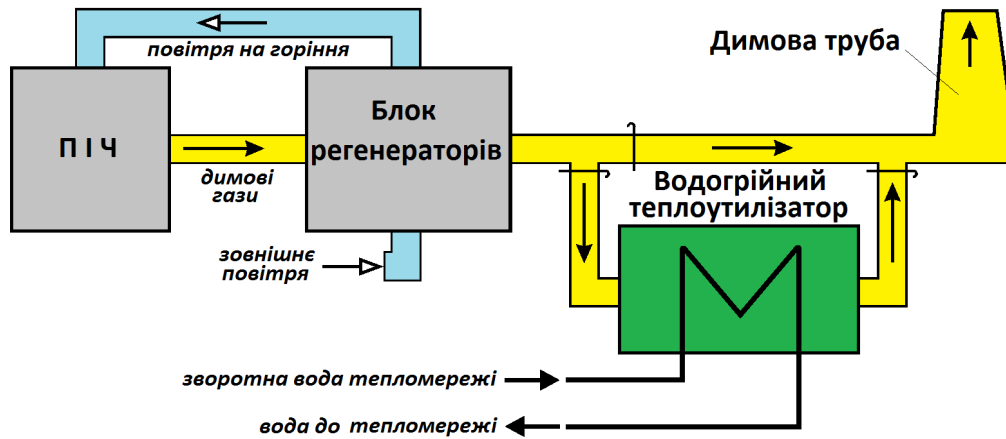
***Summary.** In order to improve the environmentally of gas-fired glass furnaces of the regenerative type and increase the operational reliability of their chimneys under the conditions of using heat-recovery technologies, it is proposed to use the method of bypassing part of the waste gases from the furnace regenerators past the heat-recovery equipment. An analysis of the effectiveness of this method was performed to improve the dispersion of harmful emissions into the surface layer under the conditions of using water-heating heat-recovery equipment.*

***Key words:** industrial furnaces, heat-recovery systems, chimneys, harmful*

*emissions, ground-level concentration, environmental efficiency.*

Серед дієвих енергоощадних напрямів, спрямованих на скорочення витрати палива в промислових скловарних печах, є впровадження теплоутилізаційних технологій, в яких реалізується підігрівання води [1-3] або повітря [4; 5] теплотою відхідних продуктів згорання. Традиційним є варіант, коли на склоробних підприємствах застосовують теплоутилізаційні системи з водогрійним устаткуванням, призначеним для нагрівання запічними газами води систем опалення, гарячого водопостачання та технологічних потреб. Завдяки такому устаткуванню забезпечується підвищення коефіцієнта ефективності використання теплоти палива печі від 7 до 10 %. Очевидно, що залучення додаткового обладнання призводить до зміни проектних режимів роботи печі, зокрема до зменшення обсягів і температури запічних газів, що відповідно викликає погіршення умов для безпечного відведення шкідливих викидів в навколишнє середовище через димовий тракт. Шкідливими речовинами у продуктах згорання скловарних печей окрім технологічного пилу зазвичай є дуже токсичні оксиди азоту та сірки [6]. Погіршення умов розсіювання цих шкідливих викидів може порушити екологічну безпеку територій поблизу підприємства.

У роботі виконано дослідження щодо покращення режимів експлуатації димових труб газоспоживальних скловарних печей шляхом застосування методів їх екологізації у разі застосування теплоутилізаційних систем з водогрійними теплоутилізаторами (рис. 1), призначеними для нагрівання тепломережної води систем опалення.



**Рис. 1. Схема системи теплоутилізації скловарної печі регенеративного типу з використанням водогрійного теплоутилізатора**

Вихідні дані для виконання розрахункових досліджень наведено в таблиці 1. Розгляду підлягали димові труби різного типу: металева, цегляна, залізобетонна та триствольна.

*Таблиця 1*

### Основні вихідні дані

Найменування показника, розмірність	Значення показника
Температура димових газів, °С	410 ÷ 440
Витрата димових газів, кг/с	12,0
Вміст шкідливих речовин у димових газах [6], мг/м <sup>3</sup>	
NO <sub>x</sub>	800 ÷ 1300
SO <sub>2</sub>	50 ÷ 1150
технологічний пил	200 ÷ 300
Початкова температура води, що нагрівається, продовж опалювального періоду при температурі навколишнього середовища від -20 до +10 °С	70 ÷ 35
Кінцева температура води, що нагрівається, °С	105 ÷ 62
Площа поверхні нагрівання водогрійного теплоутилізатора, м <sup>2</sup>	440
Витрата води, що нагрівається, кг/с	13,9
Висота димової труби, м	55
Внутрішній діаметр гирла, м	3,1

Застосування теплоутилізаційних технологій, як зазначалося, призводить до зменшення режимних характеристик димових труб (температури  $t_{г.д.г.}$  та швидкості  $W_{г.д.г.}$  газових потоків), а отже і до погіршення умов розсіювання в навколишньому середовищі шкідливих викидів печей. Дані параметри суттєво впливають на значення

максимальних приземних концентрацій  $C_m$  шкідливих викидів в навколишньому середовищі [7]. І що більші значення цих параметрів, тим менші значення  $C_m$ .

Очевидно, що чим кращі теплоізоляційні властивості оболонки димової труби, тим вище значення  $t_r^{д.г.}$  та  $W_r^{д.г.}$  газових викидів з її гирла. Завдяки зменшенню теплових втрат із поверхні оболонки труби значення зазначених величин зростають з підвищенням температури навколишнього середовища.

Для покращення екологічної обстановки в околі димових труб за умов застосування теплоутилізаційних технологій обрано метод байпасування частини гарячих газів [8-12] від регенераторів печі повз теплоутилізаційне устаткування. Цей метод дозволяє поліпшити режими експлуатації всіх розглянутих димових труб. Так при його використанні зростають значення  $t_r^{д.г.}$  та  $W_r^{д.г.}$  в гирлі цих труб і тим більше, чим вища частка байпасування  $\sigma$  та чим кращі теплоізоляційні властивості оболонки труби. Так за зміни  $\sigma$  від 0 до 40 % відносне збільшення  $t_r^{д.г.}$  становить в  $1,6 \div 1,8$  рази, а  $W_r^{д.г.}$  в  $1,2 \div 1,3$  рази.

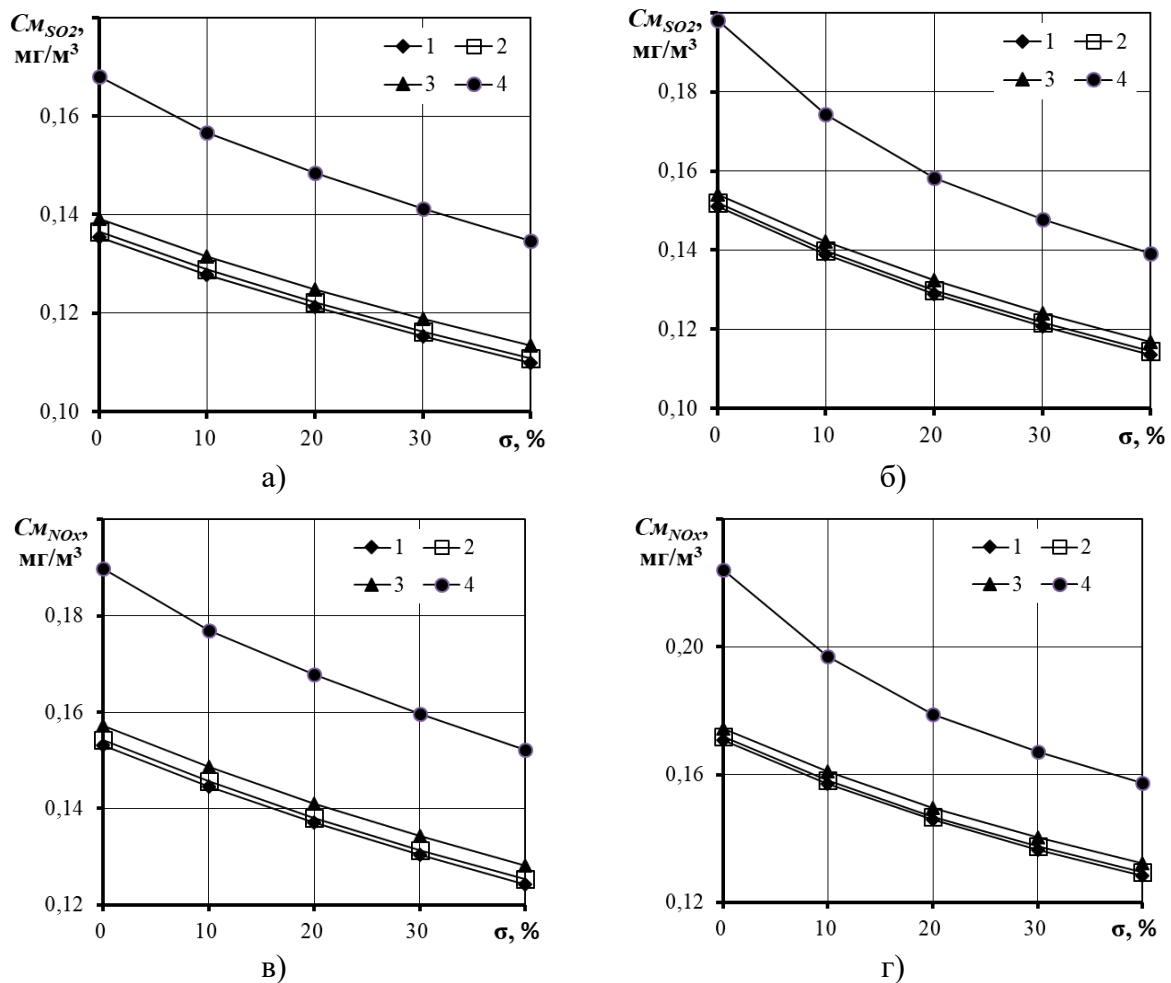
Для аналізу екологічної ефективності методу байпасування визначалися приземні концентрації  $C_m$  характерних шкідливих викидів скловарних печей в околі димових труб. Визначення максимальної приземної концентрації шкідливих викидів в навколишньому просторі труби виконувались за формулою:

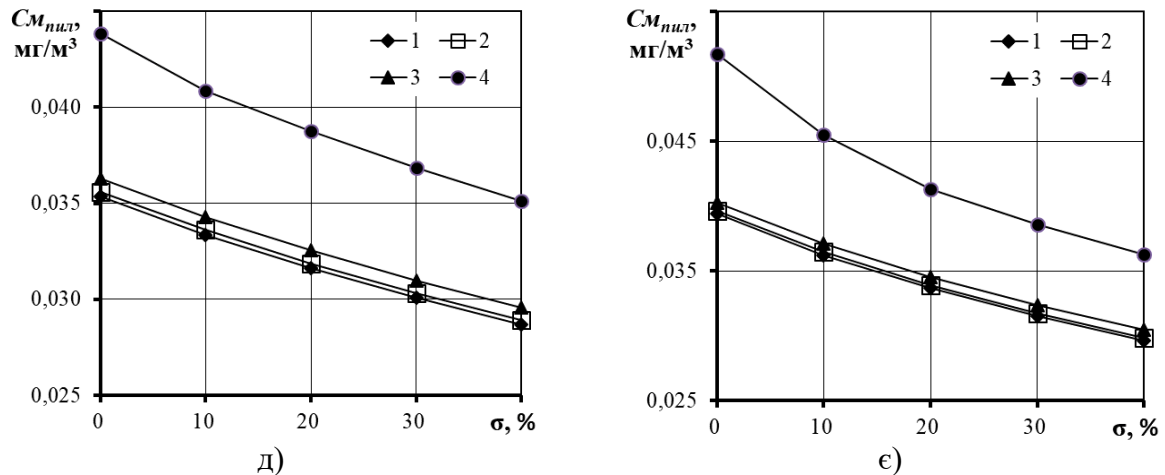
$$C_m = \frac{AMFm\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta t}},$$

де  $A$  – коефіцієнт, який залежить від температурного градієнта атмосфери, приймався для розглянутих умов у розмірі максимального значення 200; розрахункова маса шкідливої речовини, яка викидається в атмосферу за одиницю часу, становила  $M = 1,11 \div 0,25$  г/с; коефіцієнт  $F$ ,

який враховує швидкість осідання шкідливих речовин в атмосфері для газів і  $\eta$  – коефіцієнт впливу рельєфу місцевості приймалися рівними одиниці; розрахункові безрозмірні коефіцієнти, що враховують умови виходу димових газів із гирла труби становили  $m = 0,98 \div 1,23$  та  $n = 1,14 \div 1,87$ ; різниця  $\Delta t$  між температурою вихідних газів  $t_{г.в.}$  і температурою навколишнього середовища  $t_{нс}$  змінювалася в межах  $113 \div 429$  °С.

Результати розрахункових досліджень  $C_M$  за максимальних значень концентрацій шкідливих викидів (див. табл. 1) та для різних конструкцій димових труб за умови експлуатації водогрійної теплоутилізаційної системи наведено на рис. 2.





**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  $+10^{\circ}\text{C}$  (б, г, е) температурах для водогрійної теплоутилізаційної системи: 1 – цегляна; 2 – бетонна; 3 – металева; 4 – триствольна труби

Як видно з наведених результатів, значення максимальних приземних концентрацій  $C_m$  усіх розглянутих шкідливих викидів (двоокису сірки, оксидів азоту та пилу) зменшуються із зростанням часток байпасування газів повз теплоутилізаційну систему. Наведені дані досліджень також свідчать, що із збільшенням частки байпасованих газів  $\sigma$  від 0 до 40 % значення максимальної приземної концентрації  $C_m$  зменшується приблизно на 19 ÷ 25 % для викидів оксиду сірки та оксидів азоту і 21 ÷ 36 % для пилу. При цьому менші значення зменшення  $C_m$  відповідають трубам з кращими теплоізоляційними властивостями оболонки димової труби.

Покращення умов розсіювання шкідливих викидів із використанням методу байпасування характеризувалося за допомогою коефіцієнта  $k$ , який показує відносну зміну максимальних приземних концентрацій шкідливих речовин у разі застосування методу ( $C_m$ ) та без нього ( $C_0$ ):

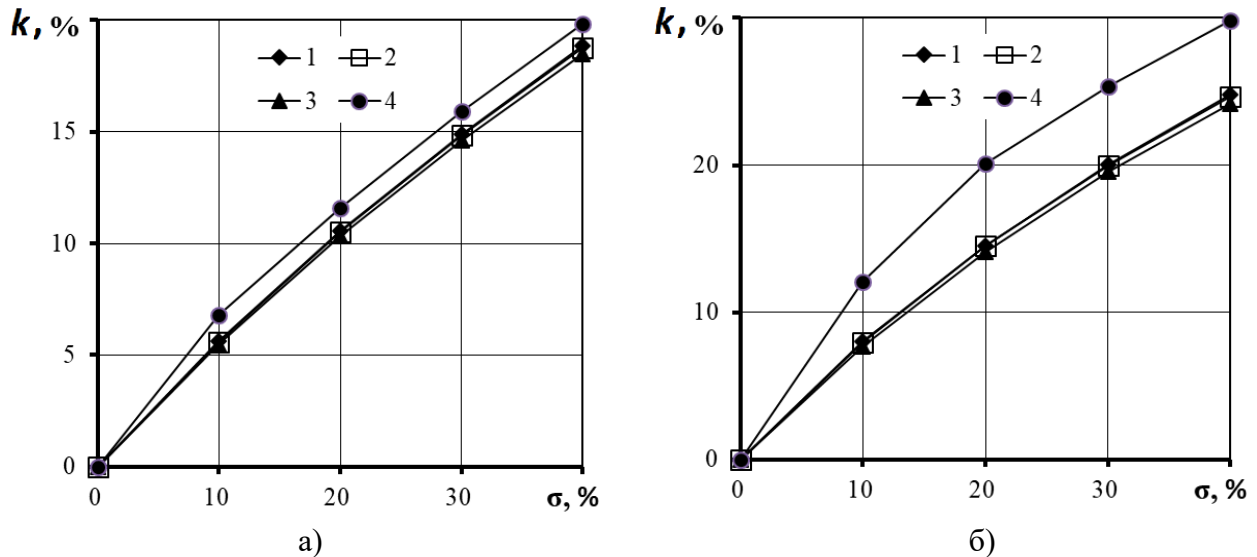
$$k = (C_0 - C_m) / C_0 \cdot 100.$$

На рис. 3 наведено результати розрахунку коефіцієнта  $k$ . Це значення для усіх досліджуваних шкідливих викидів є однаковим, оскільки залежить лише від режимних характеристик димової труби, які визначаються її типом та умовами охолодження.

Отримані дані свідчать, що за умов зростання частки байпасування газів  $\sigma$  від 0 до 40 % значення  $k$  збільшується від 0 до 30 %. Причому вплив конструкційних особливостей димових труб на величину  $k$  є помітним, і чим вищі теплоізоляційні властивості оболонки труб, тим вищий рівень його зростання.

Ще більший вплив на коефіцієнт  $k$  має температура навколишнього середовища  $t_{\text{нс}}$ . Так зі зміною  $t_{\text{нс}}$  від  $-20$  °C до  $+10$  °C значення  $k$  збільшується у 1,5 рази. Це пояснюється глибшим охолодженням запічних газів для даної системи теплоутилізації із зростанням температури  $t_{\text{нс}}$ , що відповідає зменшенню температури нагріваної в теплоутилізаторі зворотної тепломережної води. Також на значення  $k$  має вплив тип димової труби. Різниця між відповідними коефіцієнтами  $k$  для різних труб особливо помітна у теплу (осінньо-весняну) пору періоду опалення, коли спостерігається найглибше охолодження запічних газів завдяки зменшенню температури теплоносія у системі опалення. У цю пору значення  $k$  для триствольної димової труби в 1,01 і 1,15 рази вище порівняно з цегляною та металевою відповідно.





**Рис. 3. Залежність відносного значення  $k$  зменшення максимальної приземної концентрації шкідливих викидів від частки байпасованих газів  $\sigma$  для різних конструкцій димових труб при мінімальній  $-20^\circ\text{C}$  (а) та максимальній  $+10^\circ\text{C}$  (б) температурах навколишнього середовища в опалювальний період:  
1 – цегляна; 2 – бетонна; 3 – металева; 4 – триствольна труби**

Отже, запропонований в роботі метод екологізації промислових скловарних печей за умов використання водогрійних теплоутилізаційних технологій дозволяє заощадити витрату палива на піч та суттєво покращити екологічну обстановку навколо склоробних підприємств у разі застосування цих технологій.

### Література

1. 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
2. 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.

3. 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/ttpe.1.2022.10>
4. 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>
5. Fialko N. M., Navrodska R. O., Shevchuk S. I., Gnedash G. O., Presich G. O. Optimization of the design characteristics of the terminal recuperator for glass melting furnaces. *International Scientific Journal "Internauka"*. 2022. № 14. P. 45-49. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-14-8403>
6. Fialko N. M., Prokopov V. H., Navrodska R. O., Shevchuk S. I., Sliusar, A. F. Research of the composition of exhaust gases of glass-melting furnaces. *International Scientific Journal "Internauka"*. 2021. № 6. P. 49-53. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-6-7297>
7. Fialko N. M., Prokopov V. G., Navrodska R. O., Shevchuk S. I., Presich, G. O. Analysis of the environmental efficiency of boiler chimneys in the application of heat-recovery technologies. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2020. 30(4). P. 104-108. doi: <https://doi.org/10.36930/40300418>
8. 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. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-11>
9. Fialko N. M., Navrodska R. O., Presich G. A., Gnedash G. A., Shevchuk S. I. Application of an air method for protecting chimneys of boiler plants in

- heat recovery systems. *International Scientific Journal "Internauka"*. 2020. № 4(84). P. 84-87. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2020-4>
10. Fialko N. M., Navrodska R. O., Shevchuk S. I., Gnedash G. O., Sbrodova G. O. Applying the air methods to prevent condensation in gas exhaust ducts of the boiler plants. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2018. 28(10). P. 76-80. doi: <https://doi.org/10.15421/40281016>
11. 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>
12. 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>