

Технічні науки

УДК 662.99:536.24

**Фіалко Наталія Михайлівна**

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

**Fialko Nataliia**

*Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Corresponding Member of NAS of Ukraine, Department Head  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Навродська Раїса Олександрівна**

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

**Navrodska Raisa**

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

**Шевчук Світлана Іванівна**

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

**Shevchuk Svitlana**

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

**Гнедаш Георгій Олександрович**

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

**Gnedash Georgii**

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

**Пресіч Георгій Олександрович**

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

**Presich Georgii**

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

**ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
КІНЦЕВОГО РЕКУПЕРАТОРА ДЛЯ СКЛОВАРНИХ ПЕЧЕЙ  
OPTIMIZATION OF THE DESIGN CHARACTERISTICS OF THE  
TERMINAL RECUPERATOR FOR GLASS MELTING FURNACES**

***Анотація.** Виконано дослідження вибору оптимальних конструктивних характеристик мембранних панелей при різних параметрах турбулізації потоку на внутрішній поверхні труб, з яких компонується теплообмінна поверхня рекуператора, який призначено для підвищення ефективності використання палива в промислових скловарних печах завдяки охолодженню відхідних димових газів після регенераторів печі.*

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

***Summary.** Studies have been carried out on the choice of optimal design*

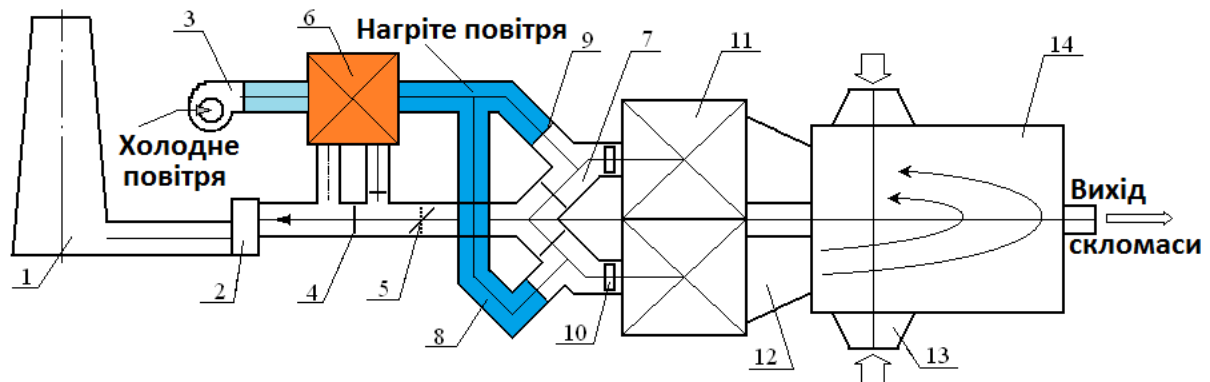
*characteristics of membrane panels for various parameters of flow turbulence on the inner surface of the pipes, from which the heat exchange surface of the heat exchanger is assembled, designed to increase the efficiency of fuel use in industrial glass melting furnaces due to the cooling of flue gases exhausted after furnace regenerators.*

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

Для підвищення ефективності використання палива в скловарних печах шляхом охолодження димових газів, що відходять після регенераторів печі, традиційно застосовують водогрійне теплоутилізаційне обладнання для нагрівання води систем опалення та гарячого водопостачання [1-3]. Ефективність такого обладнання досить висока, але обмежена через сезонність споживання гарячої води на потреби опалення, що значно знижує його річну ефективність. До того ж, потреба у тепловій енергії у вигляді гарячої води на теплопостачання власне склоробних підприємств низька порівняно з тепловим потенціалом димових газів, що викидаються у димову трубу. Тобто, на склозаводах найчастіше є можливість забезпечити і власні потреби в гарячій воді та утилізувати теплоту відхідних димових газів також для інших потреб, наприклад для підігрівання повітря, що надходить на горіння у піч. В даному випадку замість водогрійного теплоутилізаційного обладнання, або паралельно з ним, за піччю може бути розміщено теплоутилізаційне обладнання рекуперативного типу [4] для нагрівання повітря. Таке рекуперативне обладнання (поз. 6, рис. 1) є першим ступенем підігрівання холодного повітря перед надходженням його в регенератори печі.

При виборі поверхонь нагрівання для таких кінцевих рекуператорів слід враховувати особливості газів, що зазвичай характеризуються високим рівнем твердого технологічного виносу [3]. Також виникає

проблема вибору конструкційних матеріалів для виготовлення такого устаткування, обумовлена обмеженою термостійкістю застосовуваних матеріалів. У рекуператорах з нелегованого металу рекомендується здійснювати підігрівання повітря до 250 °С. При вищому рівні нагрівання повітря необхідно використовувати леговану сталь, що спричинить значне подорожчання рекуператора.



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

1 – димова труба; 2 – димосос; 3 – вентилятор; 4, 5, 9, 10 – шибери; 6 – кінцевий рекуператор; 7– димові канали; 8 – повітряні канали; 11 – регенератор; 12 – газопальниковий пристрій; 13 – завантажувальна кишеня; 14 – варильна частина печі

Для наведеної на рис.1 теплоутилізаційної схеми пропонується теплообмінну поверхню рекуператора, в якому завдяки охолодженню запічних газів реалізується попереднє підігрівання повітря перед надходженням його в регенератори печі, виконати з панелей пакетів, які утворені трубами з мембранами на їхній зовнішній поверхні (рис. 2 а, б) . У панелях використовують труби з кільцевими інтенсифікаторами теплообміну (рис. 2 в). Рух теплоносіїв у рекуператорі виконано перехресним – повітря подається до труб, а димові газі до міжтрубного простору. Конструкція труб забезпечує інтенсифікацію теплообміну всередині них у 1,6 ÷ 1,9 разів при помірному (в порівнянні з іншими методами інтенсифікації теплообміну) зростанні аеродинамічного опору з боку повітря, що нагрівається. При компонованні теплообмінної поверхні з мембранних панелей утворюються щілинні канали, до яких надходять

димові газу. Завдяки такій конструкції забезпечується можливість виконання ефективного очищення теплообмінної поверхні з боку газів від технологічного відкладення пилу. Отже, така конструкція рекуператора може бути рекомендована для застосування у схемах утилізації теплоти відхідних газів скловарних печей з високими рівнями запиленості димових газів, де необхідно здійснювати періодичне очищення нагрівальних поверхонь [3; 5].

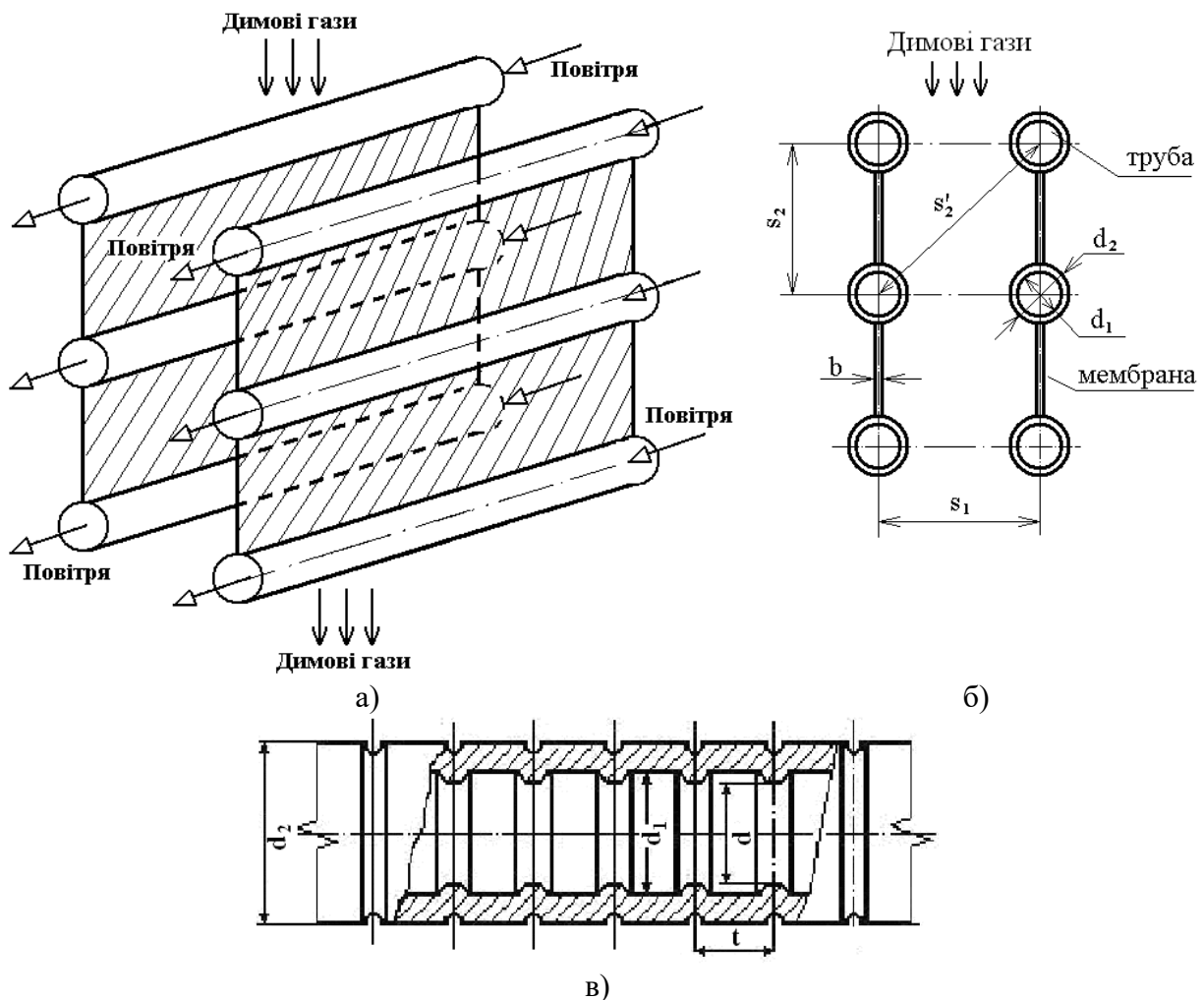
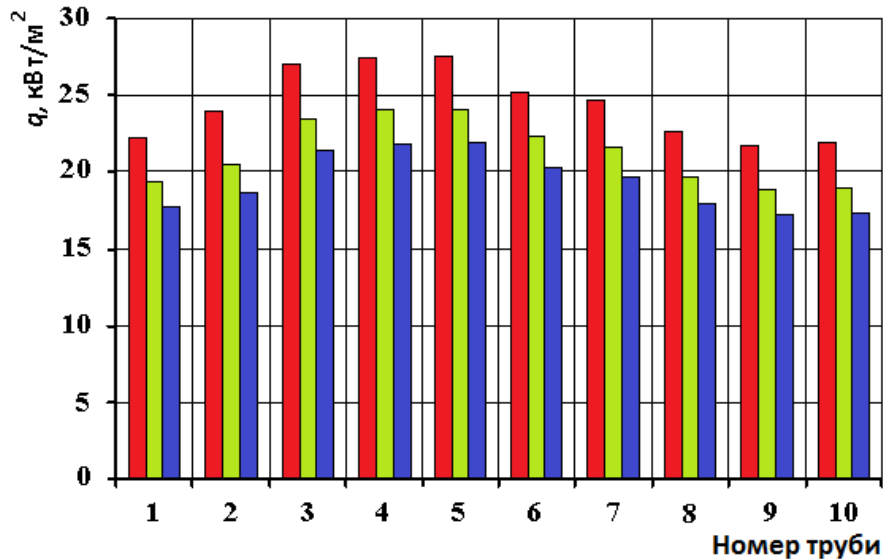


Рис. 2. Мембранні панелі:

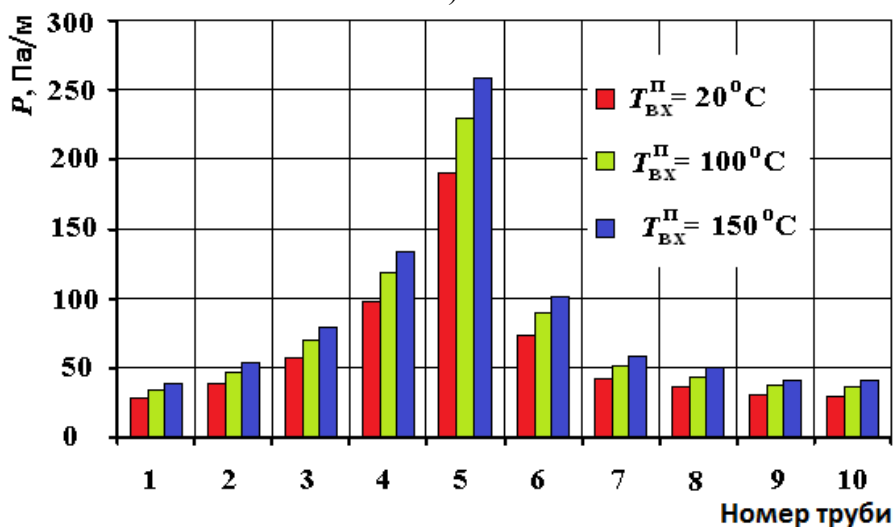
а) – схема розташування панелей та потоків теплоносіїв; б) – профіль каналу для проходження димових газів; в) труба з кільцевими інтенсифікаторами теплообміну

У роботі було проведено дослідження, зумовлені необхідністю визначення оптимальних конструктивних розмірів мембранних панелей (рис. 2) при різних параметрах турбулізації потоку на внутрішній поверхні

труб. На рис. 3 а) наведено дані щодо теплової ефективності цих поверхонь залежно від розмірів турбулізаторів. Оптимальні співвідношення параметрів труби та накатки відповідають максимальній теплопродуктивності мембранних поверхонь нагріву.



а)



б)

**Рис. 3. Питома теплова потужність  $q$  (а) та аеродинамічний опір за повітряною стороною  $P$  (б) теплообмінної поверхні кінцевого рекуператора в залежності від параметрів турбулізаторів і початкової температури  $T_{BX}^{II}$  нагріваного повітря:**

1 –  $d/d_1 = 0,983$ ;  $t/d_1 = 0,496$ ; 2 –  $0,966$ ;  $0,498$ ; 3 –  $0,943$ ;  $0,497$ ; 4 –  $0,922$ ;  $0,523$ ; 5 –  $0,875$ ;  $0,496$ ; 6 –  $0,912$ ;  $0,992$ ; 7 –  $0,946$ ;  $0,998$ ; 8 –  $0,944$ ;  $1,987$ ; 9 –  $0,942$ ;  $3,989$ ; 10 – гладка труба

Дослідження базувалися на експериментальних даних з теплообміну та гідродинаміки у трубах з кільцевими турбулізаторами потоку, знайдених у літературі [6].

Також у роботі виконані розрахункові дослідження щодо аеродинамічних характеристик зазначених теплообмінних поверхонь. На рис. 3 б) наведені дані стосовно аеродинамічного опору з повітряного боку пучків мембранних панелей із труб з кільцевими турбулізаторами. Як видно з наведених діаграм, значення параметрів турбулізаторів істотно впливають на теплотехнічні показники досліджуваного обладнання. Для умов застосування кінцевих рекуператорів найбільш вдалим для використання виявились труби за № 3, які забезпечують досить високі теплові показники при відносно невеликому аеродинамічному опорі. Дещо меншою але прийнятною ефективністю в даному відношенні характеризуються теплообмінні поверхні з трубами № 2 та №7.

### **Висновки.**

1. Запропоновано використання в теплоутилізаційних системах для промислових скловарних печей регенеративного типу повітрогрійного устаткування – кінцевого рекуператора, теплообмінна поверхня якого компонується із панелей, утворених трубами з мембранами та інтенсифікаторами теплообміну.

2. Виконано оптимізацію конструкційних характеристик такої теплообмінної поверхні та визначено, що відношення  $d/d_1 = 0,943$  та  $t/d_1 = 0,497$  є раціональними параметрами для інтенсифікаторів теплообміну, які відповідають високій тепловій ефективності рекуператора при його відносно низькому аеродинамічному опорі.

## Література

1. Fialko N., Navrodsкая 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., Navrodsкая 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. Vol. 44(1). 84-91. doi: <https://doi.org/10.31472/tpe.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. Vol. 31(4). P. 109–113. doi: <https://doi.org/10.36930/40310418>
5. 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. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-6-7297>
6. Калинин Е. М., Шароглазов В.С. Усовершенствование переключений регенеративного теплоутилизатора с неподвижной насадкой. *Промышленная энергетика*. 1997. № 2. С. 21.