

### 3. ТЕХНОЛОГІЯ ТА УСТАТКУВАННЯ



Науковий вісник НЛТУ України  
Scientific Bulletin of UNFU

<http://nv.nltu.edu.ua>

<https://doi.org/10.15421/40290724>

Article received 14.08.2019 p.

Article accepted 26.09.2019 p.

УДК 621.[1.016+184]



ISSN 1994-7836 (print)  
ISSN 2519-2477 (online)

@ Correspondence author

R. O. Navrodska

navrodska-itff@ukr.net

**Н. М. Фіалко, Г. О. Гнедаш, Р. О. Навродська, С. І. Шевчук, Г. О. Сбродова**

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

#### УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНОГО УСТАТКУВАННЯ КОТЕЛЕНЬ

Наведено результати досліджень щодо застосування в конденсаційних водогрійних теплоутилізаторах систем глибокої утилізації теплоти відхідних газів котельних установок пучків оребрених біметалевих труб певної конфігурації, а саме: з інтенсифікаторами (турбулізаторами) теплообміну всередині сталевих труб та з зовнішнім алюмінієвим оребренням. При цьому димові гази омивають оребрену поверхню, а рух нагріваної води здійснюється усередині труб. Використання таких труб дає змогу посилити теплообмін на внутрішній частині труб, що особливо важливо для конденсаційної зони теплоутилізатора, де відбувається інтенсифікація теплообміну, і з боку димових газів в разі їх охолодження нижче температури точки роси водяної пари та її конденсації. Для конденсаційної зони трубного пучка визначали раціональні геометричні параметри сталевих труб і турбулізаторів потоку на їхній внутрішній поверхні за умови рівності термічних опорів з боку димових газів і води. За результатами виконаних досліджень визначено оптимальні співвідношення параметрів сталевих труб і турбулізаторів потоку, що забезпечують значну інтенсифікацію теплообміну за відносно помірною аеродинамічною опору. Показано, що застосування пропонованих труб поліпшує також теплообмін і шляхом уповільнення процесу накипоутворення за рахунок турбулізації пристінного шару нагріваної води. Так відносне зменшення товщини відкладень для труб з турбулізаторами потоку порівняно з гладкими трубами зростає з часом і в деяких режимах перевищує значення 2.

**Ключові слова:** водогрійні теплоутилізатори; глибоке охолодження відхідних газів; інтенсифікація теплообміну; параметри оребрення труб; підвищення ефективності використання палива.

**Вступ.** Неухильне дорожчання палива на світовому ринку потребує впровадження енергоощадних технологій його споживання. У комунальній теплоенергетиці, яка характеризується значними витратами паливно-енергетичних ресурсів, заощадження палива реалізується шляхом застосування теплоутилізаційних систем з глибоким охолодженням відхідних газів котельних установок (Stepanova, 2016; Efimov et al., 2017; Fialko et al., 2018; Jaber et al., 2016; Popova & Shempelev, 2016; Levy et al., 2008; Wei et al., 2017). Підвищення ефективності теплоутилізаційного устаткування цих систем є надзвичайно актуальним завданням. Один із напрямів вирішення цього завдання полягає в удосконаленні конструкційних рішень цього устаткування.

Теплоутилізаційні системи газоспоживальних ко-

тельних установок здебільшого комплектуються конденсаційними теплообмінниками (теплоутилізаторами), в яких реалізується нагрівання води шляхом глибокого охолодження відхідних димових газів котлів. Теплообмінні поверхні таких теплоутилізаторів компонується зазвичай у вигляді пучків труб зі зовнішнім поперечним оребренням та гладкою поверхнею всередині труб (Dolinskiy et al., 2014; Navrodska et al., 2017; Navrodska et al., 2018; Fialko et al., 2018; Fialko et al., 2014). При цьому димові гази омивають оребрену поверхню, а рух нагріваної води здійснюється усередині труб. Для ефективно роботи теплоутилізатора значення параметрів оребрення труб потрібно вибирати з умови рівності термічних опорів з боку димових газів і води. У зоні конденсації теплоутилізатора відбувається істотна інтенси-

#### Інформація про авторів:

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

**Гнедаш Георгій Олександрович**, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, відділ теплофізики енергоефективних теплотехнологій. Email: navrodska-itff@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-0395-9615>

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

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

**Сбродова Галина Олександрівна**, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співробітник, відділ теплофізики енергоефективних теплотехнологій. Email: navrodska-itff@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-2539-1146>

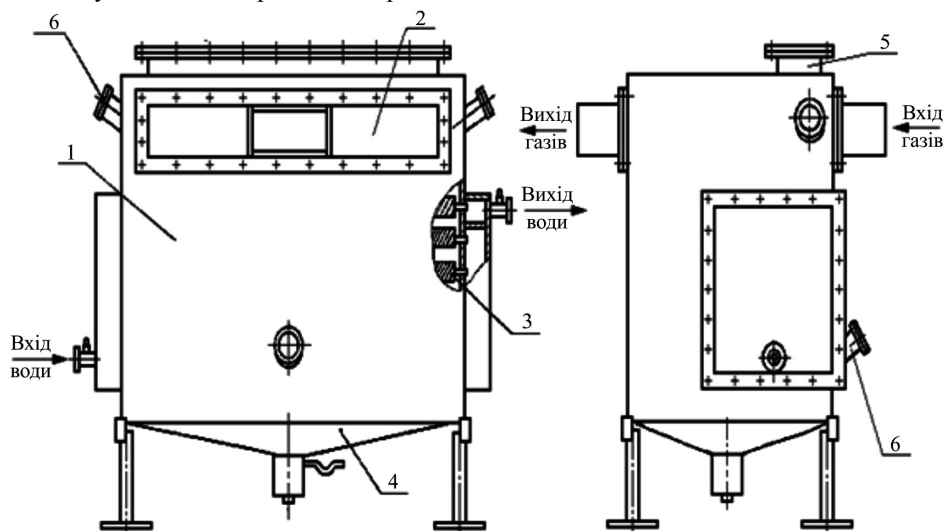
**Цитування за ДСТУ:** Фіалко Н. М., Гнедаш Г. О., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Сбродова Г. О. Удосконалення технічних рішень теплоутилізаційного устаткування котелень. Науковий вісник НЛТУ України. 2019, т. 29, № 7. С. 120–123.

**Citation APA:** Fialko, N. M., Gnedash, G. O., Navrodska, R. O., Shevchuk, S. I., & Sbrodova, G. O. (2019). Improvement of Engineering Solutions of Boiler Heat Recovery Equipment. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(7), 120–123. <https://doi.org/10.15421/40290724>

фікація теплообміну з газового боку і в разі застосування в них труб з однаковими параметрами оребрення для всієї теплообмінної поверхні зазначена умова рівності опорів порушується і лімітуючим стає теплообмін з боку води. Підвищення ефективності теплообміну в конденсаційній зоні теплоутилізатора є основним завданням цього дослідження.

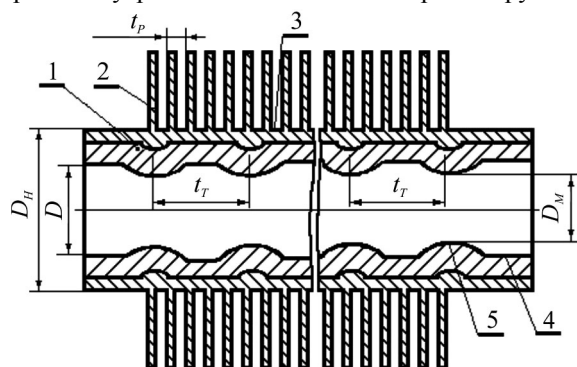
**Мета дослідження** полягає у теплофізичному обґрунтуванні використання в конденсаційних теплоутилізаторах котлів оребрених труб з інтенсифікацією теплообміну на внутрішній поверхні та визначенні оптимальних параметрів інтенсификаторів та оребрення.

**Матеріал і методи дослідження.** Принципову схему водогрійного конденсаційного теплоутилізатора відхідних газів котельних установок зображено на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема конденсаційного теплоутилізатора: 1) теплообмінник; 2) байпасний газохід; 3) біметалева оребрена труба; 4) конденсатозбірник; 5) вибуховий клапан; 6) оглядове вікно

Компонування теплообмінної поверхні у вигляді пучка біметалевих оребрених труб (сталева основа й алюмінієве оребрення) з інтенсифікацією теплообміну на внутрішній поверхні цих труб (рис. 2) дає змогу посилити теплообмін і, як наслідок, інтенсифікувати процес конденсатоутворення в зоні глибокого охолодження димових газів. При цьому важливим є завдання оптимізації параметрів оребреної труби і турбулізаторів, які, як відомо, потрібно вибирати з умови рівності термічних опорів на внутрішній та зовнішній поверхнях труби.



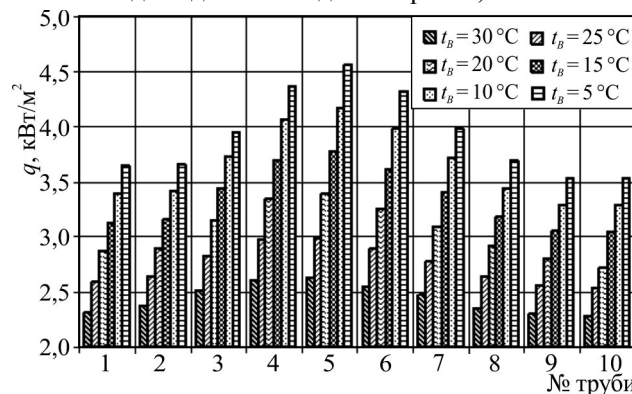
**Рис. 2.** Оребрена біметалева труба: 1) труба з кільцевими турбулізаторами; 2) алюмінієве оребрення; 3) зовнішня поверхня труби без оребрення; 4) внутрішня поверхня труби; 5) кільцеві турбулізатори

У цій роботі проведено розрахункові дослідження щодо інтенсивності теплопередачі та зміни гідравлічного опору теплоутилізатора в разі застосування в його

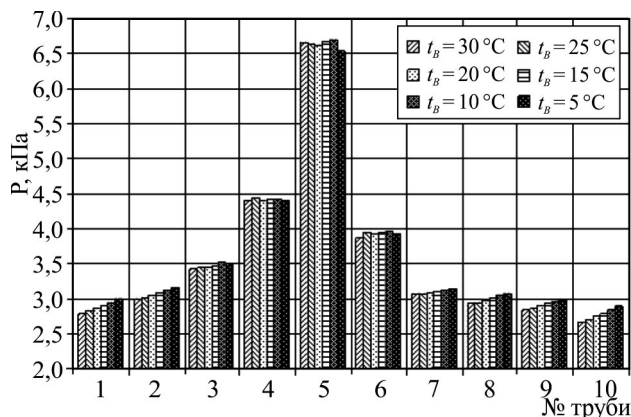
Поверхню теплообміну теплоутилізатора можна умовно розділити на дві частини. У першій відбувається охолодження продуктів згоряння до температури їхньої точки роси. Цей процес характеризується суто конвективним ("сухим") теплообміном, без зміни вологовмісту потоку. У другій частині трубного пучка відбувається глибше охолодження димових газів (нижче 60-50 °С) з конденсацією водяної пари, що міститься в газах. Конвективний теплообмін при цьому супроводжується і масообміном. Цей процес названо теплообміном з конденсацією (або "мокрим" теплообміном). Завдяки використанню теплоти конденсації димових газів досягається підвищення коефіцієнта корисної дії котла на 3-10 %.

конденсаційній зоні пропонування труб з різними параметрами турбулізаторів. Дослідження базувались на експериментальних даних стосовно теплообміну та гідродинаміки при глибокому охолодженні відхідних газів котельних установок (Navgodska et al., 2018) і в трубах з кільцевими турбулізаторами потоку (Kalinin et al., 1990). Розрахунки виконували для реальних умов роботи теплоутилізаційного устаткування в конденсаційному режимі, тобто у практичному діапазоні зміни основних параметрів відхідних газів і води.

**Результати дослідження.** Характерні результати виконаних досліджень наведено на рис. 3, 4.

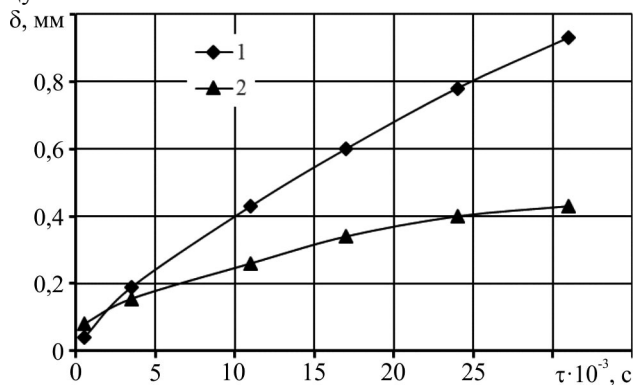


**Рис. 3.** Питова теплова потужність теплоутилізатора залежно від параметрів турбулізаторів та температури нагріваної води: 1)  $D_m/D = 0,983$ ;  $t_p/D = 0,496$ ; 2)  $0,966; 0,498$ ; 3)  $0,943$ ;  $0,497$ ; 4)  $0,922$ ;  $0,523$ ; 5)  $0,875$ ;  $0,496$ ; 6)  $0,912$ ;  $0,992$ ; 7)  $0,946$ ;  $0,998$ ; 8)  $0,944$ ;  $1,987$ ; 9)  $0,942$ ;  $3,989$ ; 10) гладка труба



**Рис. 4.** Гідравлічний опір теплоутилізатора залежно від параметрів турбулізаторів та температури нагріваної води: 1)  $D_m/D = 0,983$ ;  $t_r/D = 0,496$ ; 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

Варто зазначити, що окрім інтенсифікації теплообміну усередині пропонованої оребреної труби, уповільнюється процес накипоутворення шляхом турбулізації пристінного шару нагріваної води (Gomon et al., 1990). Ця обставина також приводить до зростання теплової ефективності теплообмінної поверхні з внутрішніми турбулізаторами потоку в трубах завдяки зменшенню товщини відкладень  $\delta$  у зіставленні з відповідними гладкими трубами (рис. 5). Результати дослідження свідчать, що відносно  $\delta$  зменшення для труб з турбулізаторами потоку  $\delta_{\text{гл}}/\delta_{\text{тт}}$  зростає з часом і може перевищувати значення 2.



**Рис. 5.** Динаміка товщини відкладень у гладких трубах  $\delta_{\text{гл}}$  та в трубах з турбулізаторами потоку  $\delta_{\text{тт}}$ : 1) гладка труба; 2) труба з кільцевими турбулізаторами

Отже, розрахункові дослідження щодо порівняння основних показників конденсаційних теплоутилізаторів із гладкими трубами і трубами з кільцевими турбулізаторами потоку на внутрішній поверхні показало, що застосування пропонованої конструкції труби має істотні переваги за відносно невеликого росту загального гідравлічного опору.

#### Висновки:

1. Виконано аналіз ефективності застосування пропонованих біметалевих оребрених труб з турбулізаторами потоку на внутрішній поверхні для інтенсифікації теплообміну в конденсаційній зоні водогрійного теплоутилізатора котельних установок.

2. Визначено оптимальні співвідношення параметрів труби і турбулізаторів потоку ( $D_m/D = 0,946$ ;  $t_m/D = 0,998$ ), що забезпечують істотну інтенсифікацію теплообміну за відносно помірною величиною гідравлічного

опору в конденсаційній зоні трубного пучка теплоутилізатора.

3. Показано, що застосування турбулізаторів на внутрішній поверхні оребрених труб забезпечує уповільнення процесу накипоутворення завдяки турбулізації пристінного шару нагріваної води.

4. Проведено зіставлення динаміки товщини відкладень теплоутилізатора, який компонується трубами з турбулізаторами потоку та без них. Ці зіставлення підтвердили ефективність застосування пропонованих оребрених труб.

#### Перелік використаних джерел

- Dolinskiy, A. A., Fialko, N. M., Navrodska, R. A., & Gnedash, G. A. (2014). Basic principles of heat recovery technologies for boilers of the low thermal power. *Industrial Heat Engineering*, 36(4), 27–35. [In Russian].
- Dreytser, G. A., Kalinin, E. K., & Yarho, S. A. (1990). *Intensification of heat transfer in channels*. Moscow: Mashinostroenie, 207 p. [In Russian].
- Efimov, A. V., Goncharenko, A. L., Goncharenko, L. V., & Esipenko, T. A. (2017). *Sovremennye tekhnologii glubokogo okhlazhdeniia produktov sgoraniia topliva v kotelnnykh ustanovkakh, ikh problemy i puti resheniia*. Kharkiv: Kharkiv Polytechnic Institute, 233 p. [In Russian].
- Fialko, N. M., Navrodska, R. A., Gnedash, G. A., Presich, G. A., & Stepanova, A. I. (2014). Increasing the efficiency of boiler plants of communal heat energy by combining the heat of the exhaust-gases. *Alternative Energy and Ecology: International Scientific Journal*, 15, 126–129. [In Russian].
- Fialko, N. M., Presich, G. A., Gnedash, G. A., Shevchuk, S. I., & Dashkovska, I. L. (2018). Increase the efficiency of complex heat-recovery systems for heating and humidifying of blown air of gas-fired boilers. *Industrial Heat Engineering*, 40(3), 38–45. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.06>
- Fialko, N., Presich, G., Gnedash, G., Navrodska, R., & Novakivskii, M. (2018). Heat-recovery technology of exhaust gases with high moisture content for gas-fired boilers of municipal heat-energy. (Ser. New solutions in modern technologies). *Bulletin of NTU "KhPI"*, 45(1321), 70–77. Kharkiv: NTU "KhPI". <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.45.09>
- Gomon, V. I., Ostapushchenko, P. G., & Aronov, I. Z. (1990). Tubular water heater for heating systems. *Water supply and sanitary technique*, 6, 12–15. [In Russian].
- Jaber, H., Khaled, M., Lemenand, T., & Ramadan, M. (2016, July). Short review on heat recovery from exhaust gas. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1758, No. 1, p. 030045). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/1.4959441>
- Levy, E., Bilirgen, H., Jeong, K., Kessen, M., Samuelson, C., & Whitcombe, C. (2008). *Recovery of water from boiler flue gas*. Office of Research and Sponsored Programs.
- Navrodska, R. A., Stepanova, A. I., Shevchuk, S. I., Gnedash, G. A., & Presich, G. A. (2018). Experimental investigation of heat-transfer at deep cooling of combustion materials of gas-fired boilers. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(6), 103–108. <https://doi.org/10.15421/40280620>
- Navrodska, R., Fialko, N., Gnedash, G., & Sbrodova, G. (2017). Energy-efficient heat recovery system for heating the backward heating system water and blast air of municipal boilers. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 39(4), 69–75. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2017.10>
- Popova, E. S., & Shempelev, A. G. (2016). Issledovanie i razrabotka sposoba utilizatsii poter teploty s ukhodiashimi gazami vodogreynogo kotla. *Energo- i resursosberezhenie. Energoobespechenie. Netraditsionnye i vozobnovliaemye istochniki energii: Vserossiiskaia nauchno-prakticheskaiia konferentsiia studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhduarodnym uchastiem*, Yekaterinburg, December 12–16, 2016. (pp. 223–226). Yekaterinburg: UrFU. Retrieved from: <http://hdl.handle.net/10995/63916>. [In Russian].

Stepanova, A. (2016). Analysis of the application combined heat recovery systems for water heating and blast air of the boiler unit. *Industrial Heat Engineering*, 38(4), 38–46. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2016.06>

Wei, M., Zhao, X., Fu, L., & Zhang, S. (2017). Performance study and application of new coal-fired boiler flue gas heat recovery system. *Applied energy*, 188, 121–129. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.132>

**N. M. Fialko, G. O. Gnedash, R. O. Navrodska, S. I. Shevchuk, G. O. Sbrodova**  
*Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

## IMPROVEMENT OF ENGINEERING SOLUTIONS OF BOILER HEAT RECOVERY EQUIPMENT

The results of studies on the effectiveness of the use in heat-recovery technologies for gas-fired heating boilers of advanced condensation heat-recovery exchangers of the exhaust-gases of boilers are presented. The proposed heat-recovery exchangers are designed for heating water in heating systems, chemical water-purification systems and other needs by cooling exhaust-gases, in some operating modes below the dew point of water vapour, contained in gases. The heat exchange surface of recovery-exchangers is composed of bundles of finned bimetallic pipes (steel base and aluminium fins) with structural features, namely: with intensification of heat transfer on the inner surface of these pipes. In this case, exhaust-gases blow round the fin surface, and the movement of water, which is heated, is carried out inside the pipes. Such a constructive solution makes it possible to enhance heat transfer inside the pipe and, as a result, to intensify the process of condensate formation in the deep cooling zone of exhaust-gases (condensation part of the heat-recovery exchanger). For this zone, the rational geometric parameters of the pipes and flow turbulators on the inner surface were determined from the condition that the thermal resistance from the exhaust-gas and water in the condensation zone of the heat-recovery exchanger is equal. The studies were carried out using experimental data on heat transfer and hydrodynamics during deep cooling of the exhaust-gases of boiler plants and in pipes with ring flow turbulators for typical modes of heat-recovery equipment of boiler plants. Based on the results of the studies, the optimal ratios of the parameters of the steel base of the pipe and the flow turbulators are determined, which provide a significant intensification of heat transfer with a relatively moderate increase in aerodynamic resistance in the condensation part of the tube bundle of the heat-recovery exchanger. It is shown that the use of the proposed pipes improves heat transfer by slowing down the process of scale formation due to turbulization of the near-wall layer of heated water. The data on the thickness of deposits on the inner surfaces of the pipes of the heat-recovery exchanger, which is composed of pipes with and without flow turbulators, are compared. It is shown that the relative decrease in the thickness of deposits for pipes with flow turbulators increases with time and can exceed 2.

**Keywords:** water heat-recovery exchangers; deep exhaust-gas cooling; heat transfer intensification; pipe finning parameters; increase fuel efficiency.