

УДК 621.45.2

doi: 10.32620/aktt.2025.4.05

В. В. КУЗНЕЦОВ

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В УТИЛІЗАЦІЙНИХ КОТЛАХ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ КОМПАКТНОСТІ

Утилізація теплоти відпрацьованих газів малообертових дизельних двигунів суднових енергетичних установок в утилізаційних котлах вважається дієвим способом підвищення їх економічної ефективності. Підвищення теплової економічності двигунів та відповідне зниження температури їх відпрацьованих газів ускладнило реалізацію цього способу. Незважаючи на підвищення вимог до вмісту сірки у суднових паливах і відповідної можливості зниження температури газів за котлом, все ще залишається проблема підвищення їх компактності. Традиційним способом для цього є інтенсифікація процесів теплопередачі шляхом застосування оребрення поверхонь. Застосовується спірально-стрічкове, шайбове, Н-подібне, розрізне, з підігнутими кромками оребрення на несучих трубах круглого, плоскоовального та еліптичного перерізів. При багатьох позитивних якостях такого способу воно має суттєвий недолік – підвищення аеродинамічного опору поверхні. Для зниження аеродинамічного пору ребер і підвищення загальної теплогідролічної ефективності поверхні запропоновано використання лункових систем на ребрах. Розглянуті варіанти таких систем на спірально-стрічковому оребренні на несучих трубах круглого перерізу та плоских ребрах на несучих трубах еліптичного перерізу. Оскільки нанесення лункових систем практично не впливають на компактність поверхонь, необхідний додатковий аналіз теплогідролічної ефективності процесів теплопередачі в суднових утилізаційних котлах з урахуванням просторового розташування поверхонь. Сучасні методи оцінки інтенсифікації процесів теплопередачі призначені здебільшого для поодиноких каналів і не дозволяють у повній мірі оцінити її ефективність у пучках труб. На підставі запропонованого модифікованого фактору аналогії Рейнольдса виконаний порівняльний аналіз процесів теплопередачі і теплопередачі для зазначених оребрених поверхонь. Отримано, що різниця показників ефективності теплопередачі і теплопередачі досягає до 21% при різному просторовому розташуванні пучків, що необхідно враховувати при обґрунтуванні типів оребрених теплообмінних поверхонь.

Ключові слова: суднова енергетична установка; утилізаційний котел; теплообмінна поверхня; ефективність; теплопередача; компактність.

Вступ

Теплообмінні апарати суднових енергетичних установок є важливою їх складовою. Вони не тільки забезпечують їх працездатність в якості охолоджувачів масла або води. Їх використовують для підвищення техніко-економічної ефективності шляхом утилізації теплоти відпрацьованих газів теплових двигунів установки. При цьому, важливою вимогою до таких теплообмінних апаратів є компактність.

Для створення компактних теплообмінних апаратів широко застосовується інтенсифікація процесів теплопередачі. Використовуються оребренні поверхні з оребренням різних типів: спірально-стрічковим, шайбовим, Н-подібним, розрізним, з підігнутими кромками та ін. з несучими трубами круглого, плоскоовального та еліптичного перерізів [1-3]. В роботі [4] запропоновано використання лункових систем на оребрених поверхнях для підвищення їх теплогідролічної ефективності.

Компактність теплообмінних апаратів в основному забезпечується компактністю їх теплообмінних поверхонь. Для оребрених поверхонь теплопередачі цю компактність можна представити як

$$\psi = \frac{F}{V} = f((d_{3_екв} + s_1) \times (d_{3_екв} + s_2)), \text{ м}^2/\text{м}^3, \quad (1)$$

де F – площа поверхні теплопередачі, м^2 ;

V – об'єм, що займає поверхня теплопередачі, м^3 ;

$d_{3_екв}$ – зовнішній еквівалентний діаметр поверхні, м ;

s_1, s_2 – відповідно поперечний та поздовжній кроки труб у пучку, м ;

$(d_{3_екв} + s_1) \times (d_{3_екв} + s_2)$ – площа елементарної комірки поверхні повздовжнього перерізу.

Порівняльна оцінка компактності пучків оребрених круглих та еліптичних труб представлена на рис.1. Для діапазону діаметрів труб, що рекомендовано використовувати в утилізаційних котлах [5],



[Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

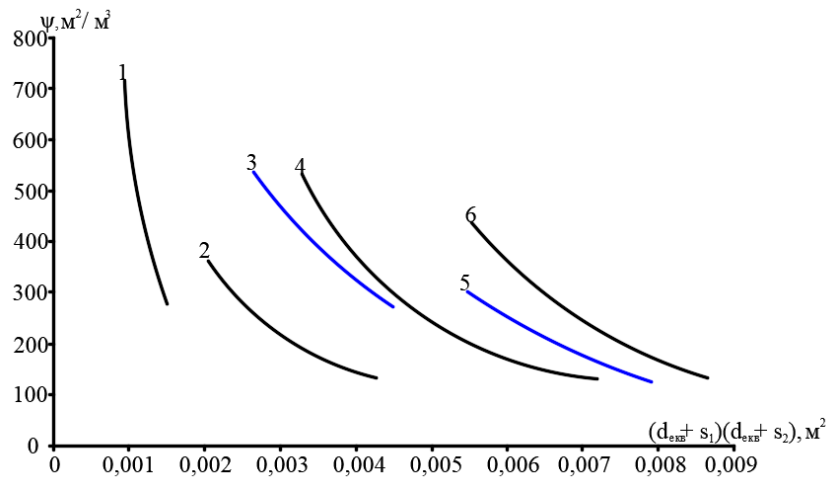


Рис. 1. Геометрична компактність пучків оребрених круглих та еліптичних труб:
 1 – $d_{\text{екв}}=0,014$ м, $h_p=0,005$ м, $\delta_p=0,000457$ м, кругла труба, плоске кругле оребрення [6, 7];
 2 – $d_{\text{екв}}=0,020$ м, $h_p=0,004$ м, $\delta_p=0,000254$ м, кругла труба, плоске кругле оребрення [7];
 3 – $d_{\text{екв}}=0,022$ м, $h_p=0,014$ м, $\delta_p=0,001$ м, еліптична труба, плоске прямокутне оребрення;
 4 – $d_{\text{екв}}=0,024$ м, $h_p=0,007$ м, $\delta_p=0,000305$ м, кругла труба, плоске кругле оребрення [6, 7];
 5 – $d_{\text{екв}}=0,028$ м, $h_p=0,011$ м, $\delta_p=0,001$ м, кругла труба, спірально-стрічкове оребрення;
 6 – $d_{\text{екв}}=0,030$ м, $h_p=0,007$ м, $\delta_p=0,000305$ м, кругла труба, плоске кругле оребрення [7]

$d_{\text{екв}} = 0,022 \dots 0,030$ м і товщині ребра $0,001$ м значення показника компактності досягає $300 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Подальше підвищення компактності досягається при використанні еліптичних труб, оребрених прямокутним плоским оребренням, з можливістю досягнення компактності на рівні $550 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

В той же час, використання лункових систем на ребрах практично не впливає на компактність теплопередавальної поверхні. Тому для обґрунтування способу інтенсифікації теплопередачі необхідний додатковий порівняльний аналіз її ефективності.

Для характеристики процесів інтенсифікації перенесення теплоти запропоновано:

– критерій теплогідравлічної ефективності поверхні теплообміну [8]

$$I = \frac{\alpha}{\alpha_0}, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі для поверхні з інтенсифікацією та гладкої (індекс 0) поверхні, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
 – коефіцієнт теплогідравлічної ефективності [9]

$$\text{TP} = \frac{(\text{Nu}/\text{Nu}_0)}{(f/f_0)^{0,33}}, \quad (3)$$

де Nu – число Нусельта; f – коефіцієнт гідродинамічного опору. Кожен з показників визначається для однакової витрати теплоносія в каналі;

– фактор аналогії Рейнольдса FAR [9, 10], який може бути представлений у вигляді функцій

$$\text{FAR} = \frac{(\text{Nu}/\text{Nu}_0)}{(f/f_0)}. \quad (4)$$

Цей коефіцієнт може бути як більшим, так і меншим за одиницю. В останньому випадку це означає неможливість покращення теплогідравлічних характеристик за рахунок даного методу при незмінних значеннях швидкості потоку і діаметру каналу.

Представлені показники призначені для оцінки процесів тепловіддачі та не враховують особливостей теплопередачі в утилізаційних котлах з різним просторовим розташуванням пучків труб.

Для оцінки ефективності процесів теплопередачі в трубчастих теплообмінних апаратах в роботі [11] запропонований модифікований фактор аналогії Рейнольдса у формі

$$\text{FAR}_k = \frac{\text{FAR}}{2} \frac{1 + \frac{\text{Nu}_{10}}{\text{Nu}_{20}}}{1 + \frac{\text{Eu}_2 \text{Eu}_{10}}{\text{Eu}_{20} \text{Eu}_1}}, \quad (5)$$

де FAR – фактор аналогії Рейнольдса, що визначається за залежністю (3); Nu та Eu – числа Нусельта та Ейлера; індекси «1» та «2» позначають значення з боку «гарячого» і «холодного» теплоносіїв; «0» – параметри «базової» поверхні, зазвичай круглого перерізу.

Останнє рівняння дозволяє визначити ефективність процесів теплопередачі в утилізаційних котлах з урахуванням особливостей просторового розташування їх трубчастих пучків.

Постановка задачі дослідження

Метою роботи є порівняльна оцінка ефективності процесів тепловіддачі за показником (4) та теплопередачі за показником (5) при різному просторовому розташуванні трубчастих пучків з різним поперечним перерізом труб.

Об'єктом дослідження є процеси тепловіддачі і теплопередачі в трубчастих пучках теплообмінних поверхонь з трубами різного перерізу.

Предметом дослідження є показники ефективності процесів тепловіддачі і теплопередачі.

Результати

Вихідними даними для розрахунку були: співвідношення поперечних і поздовжніх кроків труб у пучку $s_1/d_{\text{екв}} = 1,7$; $s_2/d_{\text{екв}} = 1,3 \dots 1,7$; еквівалентний діаметр несучої труби $d_{\text{екв}} = 0,022$ м; при спіральньо-стрічковому оребренні на круглих трубах співвідношення глибини лунки H до її діаметра d $H/d = 0,125 \dots 0,5$; при плоскому оребренні на еліптичних трубах – $H/d = 0,1 \dots 0,3$; ззовні трубний пучок обтікався потоком відпрацьованих газів з температурою 250°C та числом $Re = 12000$; всередині трубок тече насичена пара тиском $0,7$ МПа.

Результати порівняльної оцінки представлені на рис. 2.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки. Як і очікувалось, зниження показника FAR_k у порівнянні з FAR складає $24 \dots 33\%$ в

залежності від поздовжнього кроку. Значення показника FAR_k для оребреної поверхні лежить нижче залежності для оребреної поверхні при великих числах Рейнольдса, побудованої за даними [10], але з одного боку теплопередачі. Вочевидь позначається взаємний вплив труб у пучку.

При збільшенні поздовжнього кроку на оребрених спіральньо-стрічковим оребренням без лункових систем та з ними ефективність тепловіддачі підвищується 17 та 21% відповідно. При цьому зростання аеродинамічного опору поверхні складає $18,5$ та $19,4\%$ відповідно, тобто спостерігається випереджаючий приріст тепловіддачі у порівнянні з приростом гідродинамічного опору. При цьому, при поздовжньому кроці $s_2/d_{\text{екв}} > 1,5$ показник ефективності знаходиться в області $Eu/Eu_0 < 3,5$, в межах якої, згідно [10], спостерігається випереджаюче або одночасне зростання ефективності тепловіддачі над аеродинамічним опором.

Таким чином, для створення ефективних і компактних утилізаційних котлів можна рекомендувати оребрені спіральньо-стрічковим оребренням з лунковими системами теплообмінні пучки, в яких при відносному поперечному кроці $s_1/d_{\text{екв}} = 1,7$ поздовжній крок буде $s_2/d_{\text{екв}} = 1,5 \dots 1,7$.

Показники ефективності для оребрених плоским оребренням еліптичних поверхонь з лунковими системами на ребрах лежать вище лінії $FAR=1$, що показує переважаюче зростання теплопередачі над аеродинамічним опором. Показники FAR_k менші за FAR на $19 \dots 21\%$.

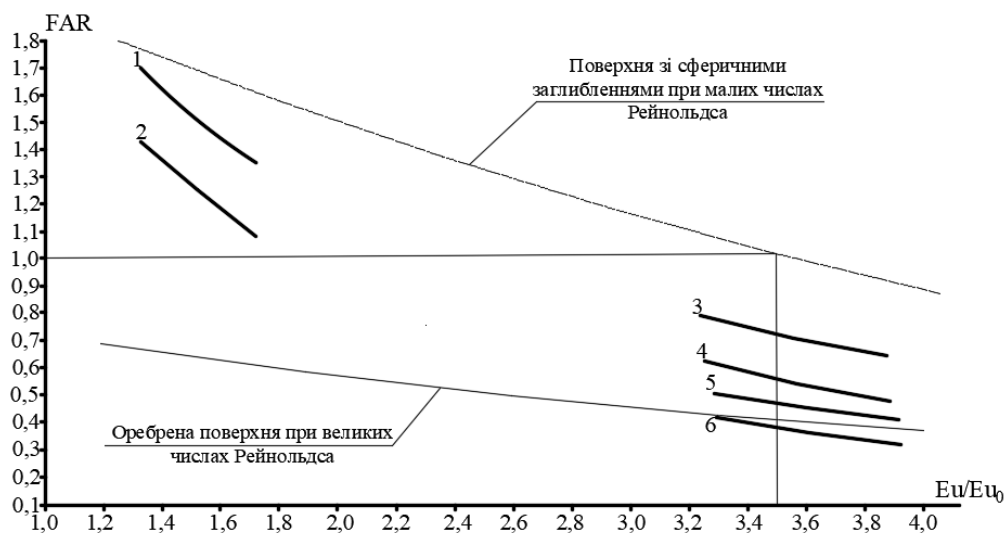


Рис. 2. Порівняльна оцінка теплогідролічної ефективності теплопередавальних поверхонь:

1, 2 – еліптична труба з плоским оребренням та лунковими системами на ребрах в умовах тепловіддачі і теплопередачі відповідно; 3, 4 – кругла труба зі спіральньо-стрічковим оребренням та лунковими системами на ребрах в умовах тепловіддачі і теплопередачі відповідно; 5, 6 – кругла труба зі спіральньо-стрічковим оребренням в умовах тепловіддачі і теплопередачі відповідно

Висновки

Результати досліджень мають теоретичне і практичне значення для обґрунтування типу оребрених поверхонь для утилізаційних котлів дизельних енергетичних установок.

Напрямок подальших досліджень є розширення даних по теплогідравлічній ефективності оребрених поверхонь для різних співвідношень геометричних параметрів лункових систем, розташування трубних пучків у просторі та схем течії теплоносіїв.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис немає супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що він не використовував методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Автор прочитав та погодився з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Thulukkanam, K. *Heat exchangers. Vol. 1: Classification, selection, and thermal design [Text]* / K. Thulukkanam. – 3rd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2024. – 703 p. DOI: 10.1201/9781003352044.
2. Aerodynamic and heat transfer characteristics of an oval-shaped tube at different reynolds numbers [Text] / Yu. V. Zhukova, A. M. Terekh, S. A. Isaev, & E. N. Pismenny // *Heat Transfer Research*. – 2020. – Vol. 51, no. 15. – P. 1383-1397. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2020035821.
3. Письменный, Е. Н. *Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребрённых труб [Текст]* / Е. Н. Письменный. – Киев, Альтпрес, 2004. 243 с.
4. Кузнецов, В. В. *Ефективність суднових енергетичних установок з теплообмінними апаратами з трубних пучків з лунковими системами [Текст]* / В. В. Кузнецов, & А. П. Шевцов // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2023. – № 4 спецвипуск 2(190). – С. 19-27. DOI: 10.32620/aktt.2023.4sup2.02.
5. *Утилізаційні котли газотурбінних установок [Текст]* / В. В. Кузнецов, С. А. Кузнецова, С. М. Мовчан, & Д. М. Соломонюк. – Миколаїв : Видавництво НУК, 2011. – 248 с.
6. Kays, W. M. *Compact Heat Exchangers. [Text]* / W. M. Kays, & A. L. London. – Malabar, FL : Krieger Publishing Company, 2018. – 347 p.

7. Bart, H. J. *Innovative Heat Exchangers [Text]* / H. J. Bart, & S. Scholl. – Germany: Springer. – 2018. – 465 p.

8. Мигай, В. К. *Моделирование теплообменного энергетического оборудования [Текст]* / В. К. Мигай – Л. : Энергоатомиздат. Ленингрд. отд-ние, 1987. – 264 с.

9. Халатов, А. А. *Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок) [Текст]* / А. А. Халатов – К. : Ин-т технической теплофизики НАН Украины, 2005. – 140 с.

10. Халатов, А. А. *Обобщение опытных данных по фактору аналогии Рейнольдса для интенсификаторов теплообмена различных типов [Текст]* / А. А. Халатов, А. В. Окишев, В. Н. Онищенко // *Пром. Теплотехника*. – 2010. – Т. 32, № 5. – С. 5–13.

11. Kuznetsov, V. V. *Multi-Level Estimation of the Heat Transfer Processes Efficiency in the Power Plants Elements [Text]* / V. V. Kuznetsov // *Problems of the Regional Energetics*. – 2020. – Iss. 3 (47). – P. 2939. DOI: 10.5281/zenodo.4018947

References

1. Thulukkanam, K. *Heat Exchangers Volume I: Classification, Selection, and Thermal Design*. Boca Raton : CRC Press. 2024. 703 p. DOI: 10.1201/9781003352044.
2. Zhukova, Yu. V., Terekh, A. M., Isaev, S. A., & Pismenny, E. N. Aerodynamic and heat transfer characteristics of an oval-shaped tube at different reynolds numbers. *Heat Transfer Research*, 2020, vol. 51, no. 15, pp. 1383-1397. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2020035821
3. Pismenny, E. N. *Теплообмен і аеродинаміка пакетів поперечно-оребрених труб [Heat transfer and aerodynamics of cross-ribbed tube packages]*. Kyiv, Altpres, 2004. 243 p. (in Russian).
4. Kuznetsov, V. V., & Shevtsov, A. P. *Ефективність суднових енергетичних установок з теплообмінними апаратами з трубних пучків з лунковими системами [Efficiency of marine power plants with heat exchangers made from tube bundles with dimple systems]*. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 2023, no. 4 sup 2 (190), pp. 19-27. DOI: 10.32620/aktt.2023.4sup2.02. (in Ukrainian).
5. Kuznetsov, V. V., Kuznetsova, S. A., Movchan, S. M., & Solomoniuk, D. M. *Utylizatsiyni kotly hazoturbinnikh ustanovok [Waste heat recovery boilers for the gas-turbine plants]*. Mykolaiv: NUK Publishing House, 2011. 248 p. (in Ukrainian).
6. Kays, W. M., & London A. L. *Compact Heat Exchangers*. Third Edition Krieger Publishing Company, Inc. USA, 2018. 347 p.
7. Bart, H. J., & Scholl S. *Innovative Heat Exchangers*. Springer, 2018. 465 p.
8. Migaii, V. K. *Modelirovanie teploobmennogo energeticheskogo oborudovaniya [Modeling of heat exchange power equipment]*. Leningrad: Energoatomizdat. Leningrad branch, 1987. 264 p. (in Russian).

9. Khalatov, A. A. *Teploobmen i gidrodinamika okolo poverkhnostnykh uglubleniy (lunok)* [Heat exchange and hydrodynamics near surface dimples (wells)]. Kyiv: *Yn-t tekhnicheskoy teplofyziky NAN Ukrainy - Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2005. 140 p. (in Russian).

10. Khalatov, A. A., Okishev, A. V., Onishenko, V. N. *Obobshchenie opytnykh dannykh po faktoru analogii Reynol'dsa dlya intensifikatorov teploobmena*

razlichnykh tipov [Generalization of experimental data on the Reynolds analogy factor for heat transfer intensifiers of various types]. *Prom. Teplotekhnika - Industrial heating engineering*, 2010, vol. 32, no. 5, pp. 5–13. (in Russian).

11. Kuznetsov, V. V. *Multi-Level Estimation of the Heat Transfer Processes Efficiency in the Power Plants Elements. Problems of the Regional Energetics*. 2020, no. 3 (47), pp. 29–39. DOI: 10.5281/zenodo.4018947.

Надійшла до редакції 15.06.2025, розглянута на редколегії 18.08.2025

ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN THE WASTE HEAT RECOVERY BOILERS OF MARINE POWER PLANTS TO INCREASE COMPACTNESS

Valerii Kuznetsov

Heat recovery of low-speed diesel engines exhaust gases of marine power plants in waste heat recovery boilers is considered an effective way to increase its economic efficiency. Increasing the engine's thermal efficiency and reducing the temperature of its exhaust gases has complicated the implementation of this method. Despite the increased requirements for the sulfur content of marine fuels and the corresponding possibility of lowering the temperature of gases behind the boiler, the problem of increasing their compactness still remains. The traditional method for this is to intensify heat transfer processes using finned surfaces. Spiral-ribbon, washer, H-shaped, split, with bent edges finning is used on round, flat-oval, and elliptical sections supporting pipes. This method has many advantages but a significant disadvantage of increased aerodynamic drag of the surface. The use of dimpled systems on the ribs is proposed to reduce the aerodynamic drag of the ribs and increase the overall thermal-hydraulic efficiency of the surface. The variants of such systems on circular-cross-section supporting pipes with spiral-ribbon finning and elliptical-cross-section flat fins on supporting pipes are considered. Since the application of dimpled systems has virtually no effect on the compactness of the surfaces, additional analysis of the thermal-hydraulic efficiency of heat transfer processes in waste-heat marine boilers is required, considering the spatial arrangement of the surfaces. Modern methods for assessing the intensification of heat transfer processes are mainly intended for individual channels and do not allow a full assessment of the effectiveness of the process in tube bundles. A comparative analysis of heat transfer and overall heat transfer processes for the specified finned surfaces is performed based on the proposed modified Reynolds analogy factor. The difference in the efficiency of heat transfer and overall heat transfer reached 21% with different spatial arrangement of bundles, which must be considered when substantiating the types of finned heat exchange surfaces.

Keywords: marine power plant; heat recovery; exhaust gases; heat transfer; overall heat transfer; efficiency.

Кузнецов Валерій Валерійович – д-р техн. наук, доц., доц. каф. технічної теплофізики і суднових паровиробних установок, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Valerii Kuznetsov – Doctor of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor at the Engineering Thermophysics and Marine Steam-generating Plants Department, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,
e-mail: valeriy.kuznetsov@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3678-595X, Scopus Author ID 54583693600.