

# ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 536.24:533.6.011

DOI: 10.20535/1810-0546.2017.2.83498

Є.М. Письменний, С.А. Рева\*, О.М. Терех, О.В. Баранюк

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

## ТЕПЛОАЕРОДИНАМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПАКЕТІВ ГВИНТОПОДІБНИХ ТРУБ

**Background.** Research and development of new highly efficient heat exchange surfaces.

**Objective.** Determination of the heat-aerodynamic efficiency of the new equally developed surfaces in the form of helical tubes packets.

**Methods.** Experimental and numerical study of heat transfer and aerodynamics of helical tubes chess packages.

**Results.** The specific heat flux which is taken away from packages of helical tubes is 30–65 % bigger than a specific heat flux which is taken away from the corresponding (respective) packages of smooth tubes at equal costs for pumping the heat transfer agent. The maximal sizes are reached for packages of type 3 tubes at  $\sigma_2 = 1,46$ .

**Conclusion.** Application of helical tubes allows increasing the intensity of heat exchange with moderate growth of an aerodynamic drag therefore it is possible to improve mass-dimensional characteristics of heat exchange devices significantly.

**Keywords:** helical tubes; equaldeveloped surface; chess packages; efficiency.

### Вступ

Застосування технологій утилізації теплоти для газотурбінних установок у енергетиці, промисловості та газотранспортних системах є основним напрямом підвищення їх енергетичної ефективності.

Втрати теплоти з викидними газами ГТУ досить значні та досягають 65–70 % від кількості теплоти, що виділяється в камері згорання. Викидні гази усіх типів ГТУ мають високий тепловий потенціал. Їх температура становить 500–800 К за витрати 50–200 кг/с [1]. Однак для використання цього залишкового теплового потенціалу необхідно істотно зменшувати температурний напір між теплоносіями.

Наявні теплообмінні поверхні, що виготовлені переважно з гладких круглих труб, вичерпали свої можливості з точки зору збільшення їх теплоаеродинамічної ефективності. Через це зменшення температурного напору можливе лише при істотному збільшенні площі теплообмінної поверхні.

Одним із раціональних методів збільшення теплоаеродинамічних характеристик поверхонь нагріву є одночасний розвиток зовнішньої та внутрішньої поверхонь труб [2–4].

Спеціалістами КПІ ім. Ігоря Сікорського для теплообмінників типу “газ–газ” розроблені методом роликового обкочування та досліджуються нові теплообмінні рівнорозвинені поверхні у вигляді пакетів гвинтоподібних труб, які мають різні геометричні характеристики [5, 6].

### Постановка задачі

Метою роботи є визначення теплоаеродинамічної ефективності нових рівнорозвинених поверхонь у вигляді пакетів гвинтоподібних труб.

### Аналіз експериментальних даних

Одночасний розвиток зовнішньої та внутрішньої поверхонь, що необхідний для збільшення відведеного теплового потоку, сприяє формуванню умов для інтенсифікації теплопереносу з обох сторін за рахунок додаткового вихроутворення та закрутки потоку. Задача з вибору оптимальних геометричних характеристик рівнорозвинених поверхонь потребує розв’язання як внутрішньої, так і зовнішньої задачі. Результати дослідження теплообміну та гідродинаміки всередині гвинтоподібних труб наведені в [7].

У нашій роботі подані результати експериментальних досліджень зовнішнього теплообміну й аеродинаміки трьох типорозмірів таких труб (табл. 1), що компонувались у шахові пакети та поперечно омивались повітряним потоком. Досліджувані гвинтоподібні труби відрізнялись не тільки глибиною ( $h$ ) та кроком ( $t$ ) гвинтових канавок, а й числом їх заходів ( $n$ ).

У роботі [7] для розв’язання задачі оптимізації характеристик процесів переносу при поздовжньому русі теплоносія всередині труби необхідна зміна числа заходів ( $n$ ). Однак умова “рівнорозвиненості” призводить до виникнення цього

\*corresponding author: reva\_sergey89@mail.ru

Таблиця 1. Геометричні характеристики гвинтоподібних труб

Тип труб	Кількість заходів спіралі	$D$ , мм	$d$ , мм	$t$ , мм	$h$ , мм	$\psi$	$H_{\text{пм}}$ , $\text{М}^2/\text{М}$
1	1	38	28	12	5	1,163	0,1388
2	1	38	31	8	3,5	1,241	0,1481
3	3	38	31	8	3,5	1,241	0,1481

додаткового геометричного фактора і при розгляді зовнішньої задачі. Значення відносних поперечного та поздовжнього кроків –  $\sigma_1 = S_1/D$  і  $\sigma_2 = S_2/D$  – змінювались відповідно в межах  $\sigma_1 = 1,105\text{--}1,842$  та  $\sigma_2 = 0,96\text{--}2,368$ . У наведеному нижче аналізі використовувались дані для найбільш цікавих у плані практичного використання “щільних” пакетів гвинтоподібних труб ( $\sigma_1 = 1,105$ ,  $\sigma_2 = 0,96\text{--}1,46$ ), які порівнювались з даними по теплообміну та опору відповідних по кроках пакетів гладких труб із зовнішнім діаметром  $D$ . Параметр  $D$  (рис. 1), використовувався як визначальний розмір у числах  $Nu$  та  $Re$  для пакетів як гладких, так і гвинтоподібних труб. Такий метод при аналізі пов’язаний із тим, що гвинтоподібні труби виготовлялись деформуванням гладких труб діаметром  $D$  та розглядаються як альтернатива останнім. Швидкість визначалась у найвужчому перерізі пакета.

Значення чисел  $Nu$  та  $Eu_0$  для пакетів гладких труб розраховувались відповідно за нормативними матеріалами [8, 9].

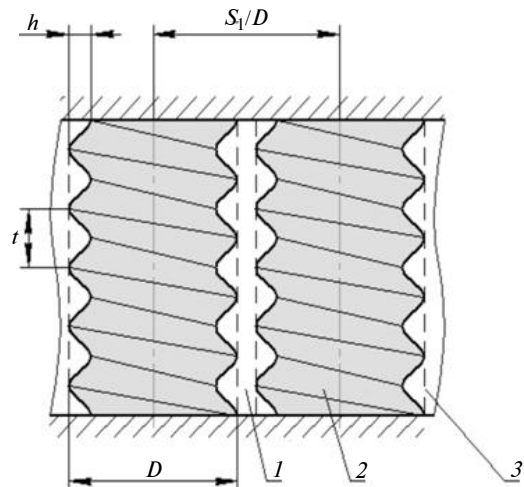
У табл. 2 наведені значення співвідношень чисел Нуссельта та Ейлера для досліджених пакетів гвинтоподібних ( $Nu$ ,  $Eu_0$ ) і базових гладких ( $Nu_{\text{гл}}$ ,  $Eu_{0\text{гл}}$ ) труб, які визначені за од-

накових чисел Рейнольдса в межах дослідженого діапазону. Для всіх розглянутих пакетів спостерігається інтенсифікація теплообміну, при цьому більші значення відношень  $Nu/Nu_{\text{гл}}$  отримані для пакетів труб типів 1 і 3. Має місце також зниження аеродинамічного опору за малих чисел Рейнольдса для пакетів труб типу 1 з більш глибокими гвинтоподібними канавками. Збільшення аеродинамічного опору спостерігається для пакетів труб типу 3, що пов’язано з більшим кутом атаки спірального навивання відносно напрямку потоку, що набігає.

Для вибору найбільш ефективних поверхонь теплообміну в [10–12] пропонується використовувати метод оцінки ефективності теплообмінних поверхонь на основі фактору аналогії Рейнольдса залежно від відношення втрат тиску інтенсифікованої поверхні до втрат тиску еталонної поверхні без інтенсифікаторів. Однак цей метод не враховує збільшення площі інтенсифікованої поверхні порівняно з еталонною не інтенсифікованою (круглі гладкі труби). Оцінка теплоаеродинамічної ефективності пакетів гвинтоподібних труб проводилась на основі залежностей  $(Q/Q_{\text{гл}}) = f(Re_{\text{гл}})$  при  $\Delta P/\Delta P_{\text{гл}} = 1$  (рис. 2), де  $Q$  – тепловий потік, що відводиться від одного



а



б

Рис. 1. Загальний вигляд (а) і геометричні характеристики гвинтоподібних труб (б): 1 – живий переріз; 2 – гвинтоподібна труба; 3 – контур гладкої труби

Таблиця 2. Теплоаеродинамічні характеристики пакетів гвинтоподібних труб

$\sigma_2$	Тип труби					
	1		2		3	
	$Nu/Nu_{\text{гл}}$	$Eu/Eu_{\text{гл}}$	$Nu/Nu_{\text{гл}}$	$Eu/Eu_{\text{гл}}$	$Nu/Nu_{\text{гл}}$	$Eu/Eu_{\text{гл}}$
0,96	1,13–1,27	0,84–1,07	1,05–1,14	0,92–1,08	1,12–1,25	1,13–1,12
1,184	1,22–1,31	0,84–0,95	1,10–1,21	0,86–1,01	1,16–1,31	1,20–1,14
1,46	1,28–1,34	0,77–0,99	1,13–1,26	0,86–1,03	1,17–1,37	0,97–1,07

погонного метра труби при однаковому температурному напорі,  $\Delta P$  – втрати тиску в пакеті.

Аналіз цих залежностей (див. рис. 2) свідчить, що відведений від пакетів гвинтоподібних труб питомий тепловий потік  $Q$  на 30–65 % більший, ніж тепловий потік, що відведений від відповідних пакетів гладких труб. При цьому максимальні значення  $Q/Q_{\text{гл}}$  характерні для пакетів труб типів 1 та 3 при  $\sigma_1 = 1,105$ ;  $\sigma_2 = 1,46$ .

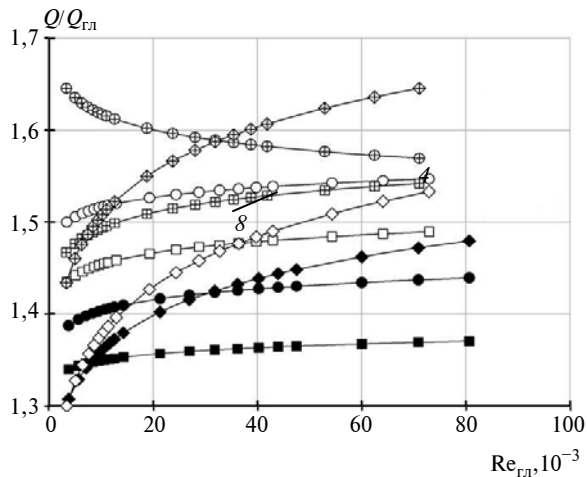


Рис. 2. Залежності  $Q/Q_{\text{гл}} = f(\text{Re}_{\text{гл}})$  при  $\Delta P/\Delta P_{\text{гл}} = \text{idem}$  та  $\sigma_1 = 1,105$ : 1, 2, 3 –  $\sigma_2 = 0,96$  для труби типу 1, типу 2, типу 3 відповідно; 4, 5, 6 –  $\sigma_2 = 1,184$  для труби типу 1, типу 2, типу 3 відповідно; 7, 8, 9 –  $\sigma_2 = 1,46$  для труби типу 1, типу 2, типу 3 відповідно

Цей ефект можна пояснити такими трьома чинниками.

Першим, найбільш явним, чинником є фактор розвитку поверхні  $\psi$ , пропорційно якому за рівних умов збільшується  $Q$ . Поверхня одного погонного метра трьох досліджуваних типів гвинтоподібних труб на 16,3 і 24,1 % більша поверхні вихідних гладких труб (див. табл. 1).

Другий чинник – більш висока, ніж при омиванні гладких труб, турбулізація потоку при поперечному омиванні гвинтоподібних труб. Числові дослідження особливостей течії біля поверхні

таких труб (рис. 3) показали, що в лобовій частині впадин гвинтоподібних труб утворюються вихрові структури, подібні до підковоподібних вихорів, які спостерігаються при поперечному омиванні ребрених труб [13]. Ці вихрові структури формують істотну тривимірність у сліду, якої не спостерігається при омиванні гладких труб.



Рис. 3. Траєкторії руху частинок потоку при омиванні поперечним потоком гвинтоподібної труби

У результаті рівень збуреності потоку в міжтрубному просторі пакетів гвинтоподібних труб значно вищий. Порівняння даних для труб типу 2 і 3, геометрія яких відрізняється тільки кількістю заходів гвинтової канавки, свідчить, що збільшення  $n$  призводить до зростання інтенсивності тепловіддачі, тому що збільшення кута атаки гвинтових виступів відносно напрямку потоку істотно збурює потік. Про визначальну роль турбулізації потоку в розглянутих процесах свідчить також те, що інтенсивність теплообміну збільшується зі зростанням  $\sigma_2$  при  $\sigma_1 = \text{const}$ . Так, для малих значень відносного поздовжнього кроку ( $\sigma_2 = 0,96$ ) приріст тепловіддачі найменший, турбулентність пригнічується у вузьких міжтрубних проміжках. Для випадку  $\sigma_2 = 1,46$  ці проміжки вже стали достатньо великими для розвитку турбулентності у ближньому сліді при збереженні високих локальних швидкостей омивання труб. Тому величина  $Q/Q_{\text{гл}}$  у розглянутому інтервалі  $\sigma_2$  набуває максимального значення.

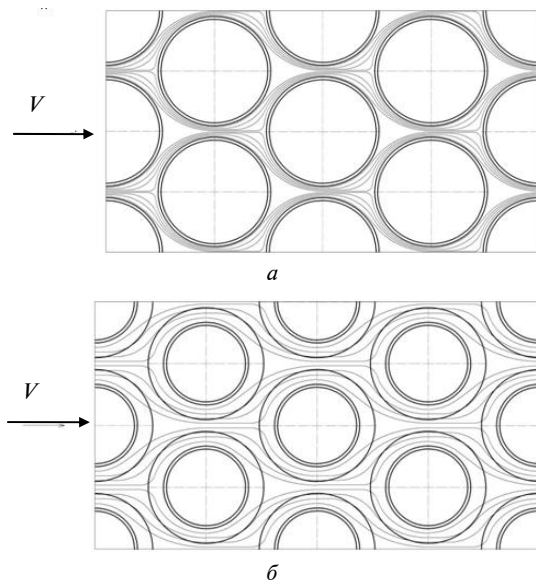


Рис. 4. Схема течії в “щільному” шаховому пакеті: *a* – гладкі труби; *б* – гвинтоподібні труби

Третій чинник – менша, ніж для відповідних гладких труб, площа міделевого перерізу гвинтоподібних труб (див. рис. 1, *б*) і, як наслідок, більший живий переріз для проходу теплоносія в пакетах гвинтоподібних труб при  $\sigma_1 = \text{idem}$ . Саме тому зменшується кривизна лі-

ній току (рис. 4) – коефіцієнт опору пакета. Менший коефіцієнт опору дає змогу досягати значень  $\Delta P$ , що характерні для шахових пакетів із гладких круглих труб ( $\Delta P / \Delta P_{\text{гл}} = 1$ ), за більших швидкостей потоку, що своєю чергою призводить до інтенсифікації теплообміну.

### Висновки

Встановлено, що відведений від пакетів гвинтоподібних труб питомий тепловий потік  $Q$  на 30–65 % більший, ніж тепловий потік, що відведений від відповідних пакетів гладких труб.

Максимальні значення  $Q / Q_{\text{гл}}$  характерні для пакетів труб типу 1 і 3 при  $\sigma_1 = 1,105$ ;  $\sigma_2 = 1,46$ .

Застосування гвинтоподібних труб дає змогу збільшити інтенсивність теплообміну при помірному збільшенні аеродинамічного опору, за рахунок чого можна істотно покращити масогабаритні характеристики теплообмінних пристроїв.

У подальшому доцільно більш детально дослідити вплив кількості заходів гвинтової канавки на теплоаеродинамічні характеристики пакетів гвинтоподібних труб.

### Список літератури

1. Юрацик И.Л., Глушенко Л.Ф., Маторин С.А. Утилизация теплоты приводных газотурбинных установок. – К.: Техника, 1991. – 152 с.
2. Pis'tenniy E.N. Ways for improving the tubular heaters used in gas turbine units // Thermal Eng. – 2012. – 59, no. 6. – P. 485–490.
3. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К. Калини, Г.А. Дрейцер, И.З. Копп, А.С. Мякогин. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 400 с.
4. Антуфьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. – М.; Л.: Энергия, 1966 – 184 с.
5. Теплообмін малорядних пучків гвинтоподібних труб / С.А. Рева, В.А. Рогачов, О.М. Терех, О.В. Алфьорова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – 3, № 8. – С. 54–60.
6. Теплообмінна труба: Патент на корисну модель № 67783 Україна, МПК F28F1/08 / Є.М. Письменний, О.М. Терех, О.І. Руденко та ін.; заявник та володар патенту на корисну модель НТУУ “КПІ”. – u201108293; Заявл. 01.07.2011; Опубл. 12.03.2012, Бюл. № 5.
7. Теплоаеродинамічна ефективність гвинтоподібних труб з рівнорозвиненою поверхнею / Л.В. Демчук, В.А. Рогачов, О.М. Терех, О.І. Руденко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – 5, № 8. – С. 26–30.
8. Аэродинамический расчет котельных установок: нормативный метод / Под ред. С.И. Мочана. – М.: Энергия, 1977. – 256 с.
9. Тепловой расчет котельных агрегатов: нормативный метод / Под ред. Н.В. Кузнецова. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
10. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика около поверхности углублений (лунок). – К.: Ин-т технической теплофизики НАН Украины, 2005. – 140 с.
11. Доник Т.В., Халатов А.А. Теплогидравлическая эффективность и качество интенсификаторов теплообмена закручивающего типа // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – 3, № 10. – С. 43–46.
12. Кузнецов В.В., Якимович А.В. Тепло и гидродинамическая эффективность пучков эллиптических труб // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 3/3 (45). – С. 53–56.
13. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-орезренных труб. – К.: Альтерпрес, 2004. – 244 с.

## References

- [1] I.L. Yuraschik *et al.*, *Utilization of the Heat of Driving Gas – Turbine Installations*. Kyiv, Ukraine: Tehnika, 1991 (in Russian).
- [2] E.N. Pis'menniy, "Ways for improving the tubular heaters used in gas turbine units", *Thermal Eng.*, vol. 59, no. 6, pp. 485–490. doi: 10.1134/S0040601512060080
- [3] E.K. Kalinin *et al.*, *Effective Surfaces of Heat Exchange*. Moscow, Russia: Energoatomizdat, 1998 (in Russian).
- [4] V.M. Antufev, *Efficiency of Various Forms of Convective Surfaces of Heating*. Moscow, Leningrad, SU: Energy, 1966 (in Russian).
- [5] S.A. Reva *et al.*, "Heat transfer of few bundles of screw shaped tubes", *Vostochno-Evropskij Zhurnal Peredovyh Tehnologij*, vol. 3, no. 8, pp. 54–60, 2013 (in Ukrainian). Available: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/14837/12639>
- [6] E.N. Pis'menniy, "Heat exchange tubes", Ukr. Patent 67783, March 12, 2012 (in Ukrainian).
- [7] L.V. Demchuk *et al.*, "Heat-aerodynamic efficiency of helical tubes with equaldeveloped surface", *Vostochno-Evropskij Zhurnal Peredovyh Tehnologij*, vol. 5, no. 8, pp. 26–30, 2011 (in Ukrainian). Available: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/1274/1175>
- [8] *Aerodynamic Calculation of Boilers: Normative Method*, S.I. Mochan, Ed. Moscow. SU: Energy, 1977 (in Russian).
- [9] *Thermal Calculation of Boilers: Normative Method*, N.V. Kuznetsov, Ed. Moscow: SU: Energy, 1973 (in Russian).
- [10] A.A. Halatov, *Heat Exchange and Hydrodynamics Near the Surface of Deepenings (Holes)*. Kyiv, Ukraine: Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2005 (in Ukrainian).
- [11] T.V. Donik *et al.*, "Thermohydraulic efficiency of heat exchange and the quality of intensifiers of torsional type", *Vostochno-Evropskij Zhurnal Peredovyh Tehnologij*, vol. 3, no. 10, pp. 43–46, 2012 (in Ukrainian). Available: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/4183/3946/>
- [12] V.V. Kuznetsov *et al.*, "Heat and hydrodynamic efficiency of bunches of elliptic pipes", *Vostochno-Evropskij Zhurnal Peredovyh Tehnologij*, no. 3 (45), pp. 53–56, 2010 (in Ukrainian). Available: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2797/2603>
- [13] E.N. Pis'menniy, *Heat Transfer and Aerodynamics of Package Transversely Finned Tubes*. Kyiv, Ukraine: Alterpress, 2004 (in Russian).

Є.М. Письменний, С.А. Рева, О.М. Терех, О.В. Баранюк

## ТЕПЛОАЕРОДИНАМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПАКЕТІВ ГВИНТОПОДІБНИХ ТРУБ

**Проблематика.** Розробка та дослідження нових вискоефективних поверхонь теплообміну.

**Мета дослідження.** Визначення теплоаеродинамічної ефективності нових рівнорозвинених поверхонь у вигляді пакетів гвинтоподібних труб.

**Методика реалізації.** Експериментальне та числове дослідження теплообміну й аеродинаміки шахових пакетів гвинтоподібних труб.

**Результати дослідження.** Питомий тепловий потік  $Q$ , що відводиться від пакетів гвинтоподібних труб, на 30–65 % більший за питомий тепловий потік, що відводиться від відповідних пакетів гладких труб, за однакових витрат на прокачування теплоносія. При цьому максимальні величини досягаються для пакетів труб типу 3 при  $\sigma_2 = 1,46$ .

**Висновки.** Застосування гвинтоподібних труб дає змогу підвищити інтенсивність теплообміну при помірному збільшенні аеродинамічного опору, за рахунок чого можна істотно покращити масогабаритні характеристики теплообмінних пристроїв.

**Ключові слова:** гвинтоподібна труба; рівнорозвинена поверхня; шахові пакети; ефективність.

Е.Н. Письменный, С.А. Рева, А.М. Терех, А.В. Баранюк

## ТЕПЛОАЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВИНТООБРАЗНЫХ ТРУБ

**Проблематика.** Разработка и исследование новых высокоэффективных поверхностей теплообмена.

**Цель исследования.** Определение теплоаэродинамической эффективности новых равноразвитых поверхностей в виде пакетов винтообразных труб.

**Методика реализации.** Экспериментальное и численное исследование теплообмена и аэродинамики шахматных пакетов винтообразных труб.

**Результаты исследования.** Удельный тепловой поток, отводимый от пакетов винтообразных труб, на 30–65 % больше удельного теплового потока, отводимого от соответствующих пакетов гладких труб, при равных затратах на прокачку теплоносителя. При этом максимальные величины достигаются для пакетов труб типа 3 при  $\sigma_2 = 1,46$ .

**Выводы.** Использование винтообразных труб позволяет увеличить интенсивность теплообмена при умеренном росте аэродинамического сопротивления, в результате чего можно существенно улучшить массогабаритные характеристики теплообменных аппаратов.

**Ключевые слова:** винтообразная труба; равноразвитая поверхность; шахматные пакеты; эффективность.

Рекомендована Радою  
теплоенергетичного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
16 листопада 2016 року