

УДК 536.24:541.11

ОСОБЛИВОСТІ ТЕПЛООБМІНУ І АЕРОДИНАМІКИ ПРИ ОБТІКАННІ ПОВІТРЯМ ПУЧКІВ ПРЯМИХ КРУГОВИХ ЦИЛІНДРІВ

Халатов А.А., академік НАН України, Коваленко Г.В., к.т.н. Мулярчук М.А.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна.

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.1>

Виконано оцінку зміни інтенсивності тепловіддачі і гідравлічного опору пучка кругових циліндрів після нанесення на їх зовнішню поверхню спіральних канавок різного кроку і поперечного перерізу. Проведено порівняння з результатами комп'ютерного моделювання. Досліджено вплив роздільної пластини (спліттера), закріпленої на кормовій твірній циліндра.

An assessment was made of changes in the intensity of heat transfer and hydraulic resistance of a bunch of circular cylinders after applying spiral grooves of different pitches and different cross section to their outer surface. A comparison has been made with the results of computer modeling. The influence of the separating plate (splitter), fixed on the aft generatrix of the cylinder has been studied.

Бібл. 8, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: круговий циліндр; однорядний пучок циліндрів; потік повітря; температура; перепад тиску; теплообмін; роздільна пластинка, (спліттер).

 D – діаметр; Eu – Ейлера число; f – частота; h – висота; L_p – довжина роздільної пластини (спліттера); Nu – Нусельта число; Pr – Прандтля число; Re – Рейнольдса число; S – крок; T – температура; t – час; w – швидкість; FAR – фактор аналогії Рейнольдса; α – коефіцієнт тепловіддачі; Δ – різниця; ρ – густина.**Вступ**

Обтікання циліндрів – поширене явище в природі, науці і техніці, особливо в випадках застосування середовищ, що суттєво відрізняються своїми властивостями. Питання міцності циліндрів виникають при будівництві опор мостів, штучних островів, стартових споруджень для ракет, авіації. Спеціальною галуззю є випускні труби джерел надлишкової теплоти і шкідливих речовин, де до задач міцності додаються проблеми теплообміну, вібрацій, конвекції.

В останній час велику увагу приділяють мінімізації розмірів і маси теплообмінних апаратів дослідники космосу і військові спеціалісти. Тому питання інтенсифікації теплообміну набувають додаткового значення.

Комп'ютерне моделювання показало виняткову перспективність застосування даного підходу для досліджень. Застосування потужних комп'ютерів до-

зволило використати нові моделі турбулентності, в тому числі і для розрахунків конвективного теплообміну при поперечному обтіканні пакетів циліндрів.

З огляду на вищевикладене, вивчення теплообміну і аеродинаміки на основі експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання є актуальним

Мета роботи

Метою роботи є оцінка різних способів інтенсифікації теплообміну при обтіканні повітрям пучків циліндрів при можливій мінімізації втрат тиску [1].

Створення компактних апаратів для космосу і озброєння війська вимагають розв'язання подібних проблем.

Аналіз стану досліджень

Існує велика кількість публікацій, в яких висвітлюється багато питань сформульованої теми. Широко відомі роботи, Жукаускаса А., Мигая В.К.,

Шліхтінга Г., Халатова А. А. [2-7]. Зокрема, розглядались випадки різних варіантів шерхності поверхні циліндрів. Особливе значення мають розвиток і тестування пакетів прикладних програм, створених на основі великої кількості експериментальних робіт. Розрахунки обмежувались інтегральними напівемпіричними підходами з використанням критеріальних співвідношень. В [8] проаналізовано вплив на теплообмін і аеродинаміку роздільних пластин (спліттерів). Зрозуміло, що в цьому напрямку доцільна ціла серія практичних робіт. Вивчення даної проблеми на основі числового моделювання показало виняткову перспективність даного підходу.

Сам по собі процес обтікання кругового циліндру не простий і складається з декількох стадій: ударного нагінання на лобову частину циліндра, поступового наближення до найширшої його частини (діаметра), де відбувається перехід в зону, яка дозволяє потоку розширятись з відповідною зміною тиску. Тут можливий відрив потоку. Якщо циліндр має фактуру поверхні, однаковою на всьому її протязі, події на правій і лівій половинках циліндра будуть розвиватися однаково, і дві частини потоку зіткнуться біля кормової частини циліндра, чим загальмують одна одну. Відповідно зменшиться і тепловіддача.

Методи досліджень

Досліди виконувались на стенді ІТТФ НАН України, загальний вигляд якого представлено на рис. 1.

Вентилятор створював розрідження і повітря засмоктувалось в робочу ділянку з приміщення, завдяки цьому вдавалось зменшити коливання температури і вологості. На вході розміщувався хонейкомб для вирівнювання профіля швидкостей.

Діаметр досліджуваних циліндрів $D=22$ мм, висота їх активної зони $h=160$ мм. Використовувались як циліндри з гладкою поверхнею, так і циліндри, на зовнішній поверхні яких була нанесена спіральна канавка. Кроки канавок були 10 мм, 20 мм, 40 мм. Канавки мали прямокутний або овальний поперечний переріз. Ширина канавок становила 2,5 мм, глибина – 2 мм. Швидкості повітря в найвужчому місці між циліндрами відповідали діапазону чисел Рейнольдса $3300 < Re < 14500$. Температура повітря на вході в пучок циліндрів була в діапазоні $15^{\circ}\text{C} < T < 22^{\circ}\text{C}$. Для вимірювання температур використовувались ртутні термометри і хромель-копелеві термопари. Тиск на вході в робочу ділянку – атмосферний. Тиск і його перепади вимірювались дифманометром «Tesla». Для визначення коефіцієнту тепловіддачі використовувався метод льоду, що тане [7].

Результати досліджень.

Досліджувалося натікання повітря на циліндр перпендикулярно до його осі. Одночасно присутні кілька явищ: гальмування потоку в лобовій частині циліндру, інтенсивний теплообмін при наближенні до діаметру циліндра. Після проходження діаметра циліндра в потоці виникає розрідження, яке супроводжувалось відривом потоку.

На рис. 2 показано результат комп'ютерного моделювання досліду з такими параметрами: температура на вході $T_i = 19^{\circ}\text{C}$, число Рейнольдса $Re = 3371$, число Нуссельта $Nu = 133$. Відстані між центрами вихорів, що зірвались, приблизно однакові і дорівнюють $l = 28$ мм. Перепад статичного тиску між входом в пучок циліндрів і виходом з нього знаходився в межах $20 \text{ Па} < \Delta p < 228 \text{ Па}$. На поверхнях вихорів помітні дрібні виступи, які відповідають більшим частотам коливання поверхні.



Рис. 1. Аеродинамічна труба для дослідження теплообміну і аеродинаміки при обтіканні повітрям пучків циліндрів

Відмітимо, що вихори, які зриваються з правого і лівого бортів циліндру, обертаються в протилежних напрямках, з чим і пов'язано гальмування потоку в кормовій зоні. Для боротьби з цим явищем використовувався один з методів зменшення опору пучка циліндрів. Він полягав в тому, що на зовнішній поверхні більшості циліндрів були спіральні канавки, які зміщували вздовж осі циліндру точку відриву одного вихору по відношенню до сусіднього з іншої сторони циліндра (рис. 2). Крім того канавка дещо збільшувала площу теплообміну.

На рисунку 2 видно загальмований потік в лобовій і кормовій зонах циліндру, максимальні швидкості обтікання мають місце на бічних ділянках. Поверхні вихорів вкриті дрібними виступами і дифманометр «Tesla» їх фіксував. Відстані між вихорами майже однакові за винятком проміжку між першим вихором і циліндром, який значно більший за інші проміжки (рис. 2).

Залежність зменшення опору від кроку канавки не-монотонна. Найкращі результати показали канавки з кроками спіралей 10мм і 40мм. При цьому значення фак-

тору аналогії Рейнольдса становили $1,859 < FAR < 2,382$. Величину $FAR = 2,382$ при кроку 40мм досягнуто при дещо меншому опорі ($Eu_{40}/Eu_0 = 0,82$), ніж для пучка циліндрів з кроком канавки 10 мм ($Eu_{10}/Eu_0 = 0,95$).

Досліджено вплив спіральної канавки, утвореної на зовнішній поверхні циліндра методом комп'ютерного моделювання. Картина обтікання циліндра зі спіральною канавкою прямокутного поперечного перерізу з кроком 20мм наведено на рис. 3.

Дещо краще співвідношення між збільшенням теплообміну і ростом перепаду тиску показує застосування спіральних канавок не з прямокутним поперечним перерізом, а з овальним [1, 7]. При цьому важливо, щоби бічні стінки овальної канавки при виході на зовнішню поверхню циліндра утворювали з нею гострий кут (рис.4).

Експериментальне дослідження обтікання пучка циліндрів з канавками показує причину виникнення поперечної складової швидкості, яка зменшує розміри застійної зони за циліндром, виникнення додаткових частот коливання потоку і інтенсифікацію

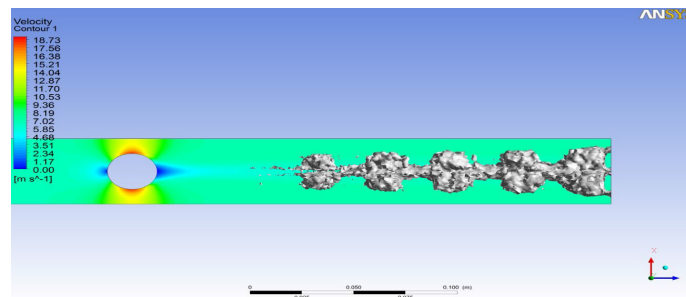


Рис. 2. Обтікання одиночного циліндра поперечним потоком повітря

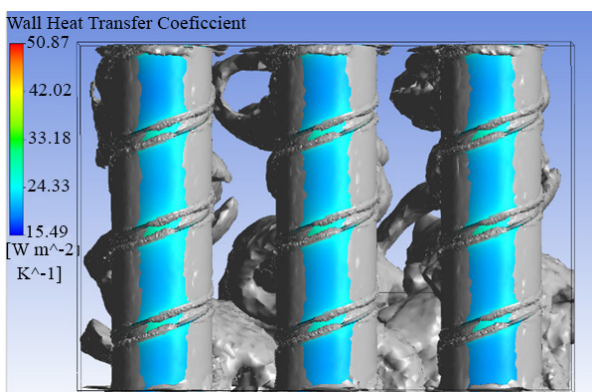


Рис. 3. Результати комп'ютерного моделювання обтікання однорядного пучка циліндрів зі спіральними канавками

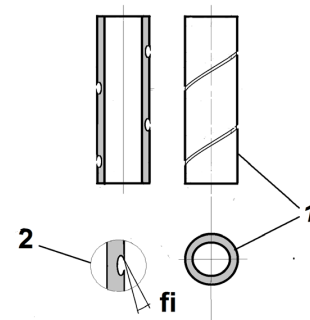


Рис. 4. Трубчаста поверхня з канавками овального поперечного перерізу. 1 – вид на циліндр-калориметр збоку і вздовж його осі; 2 – поперечний переріз овальної канавки з гострим виходом (fi) з канавки на зовнішню поверхню циліндра

теплообміну. Комп'ютерне моделювання підтверджує ці положення. Приріст теплообміну перевершує збільшення теплообмінної поверхні при невеликому рості газодинамічного опору пучка. Застосування гострих країв, через які потоки з канавок виходять на зовнішні поверхні циліндрів, дають додатковий фактор впливу не тільки на теплообмін, але й на втрати тиску.

В дослідах використовувались канавки з кутом загострення кромки $\phi = 45$ градусів. В результаті фактори аналогії Рейнольдса збільшувалися і при числі Рейнольдса $Re = 14500$ становили $FAR_{10} = 1.964$, при $(Eu_{10}/Eu_0 = 0.84)$ $FAR_{20} = 1.512$ при $Eu_{20}/Eu_0 = 0.84$, $FAR_{40} = 2.608$ при $Eu_{40}/Eu_0 = 0.51$).

Останній метод інтенсифікації теплообміну, розглянутий в роботі, полягає в тому, що посередині кормової зони циліндру встановлюють тонку роздільну пластину, тертя вихорів об яку виявляється меншим, ніж їх взаємодія в вільному потоці. Розміри пластин (довжина) в різних дослідах становили $L_{p1} = 25$ мм, $L_{p2} = 67$ мм, $L_{p3} = 84$ мм. На рис. 5 наведено схему розміщення роздільних пластин.

Як показали досліди, ступінь інтенсифікації теплообміну суттєво залежить від довжини роздільної пластини 2. Коли ланцюжок вихорів стає довшим, ніж роздільна пластина, вони одержують можливість змішуватись, і цим збільшувати перепад тиску за циліндром. Якщо напрямок потоку повітря не постійний, необхідно забезпечити можливість зміни положення

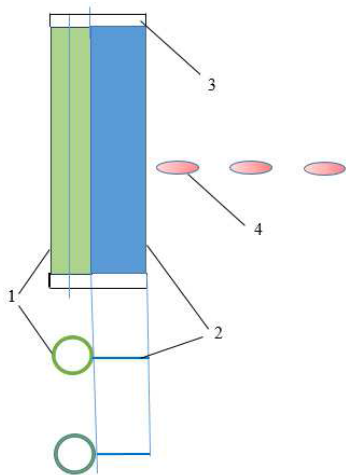


Рис. 5. Схема розміщення роздільних пластин (спліттерів) 2 за циліндрами 1.

3 – обічайка; 4 – вихори, що відірвалися від поверхні циліндра

роздільних пластин у відповідності з напрямом потоку. Для цього служать обічайки 3, які забезпечують легкий поворот роздільної пластини навкруги осі циліндра. Додаткова корисна роль роздільних пластин (спліттерів) полягає в придушенні вібрацій на поверхні вихорів, що відірвалися від циліндру [8].

В дослідах на однорядному пучку циліндрів використовувались 3 розміри роздільних пластин: $L_p = 25$ мм, $L_p = 67$ мм, $L_p = 84$ мм. Роздільні пластини закріплювались в пучку циліндрів за одним середнім або за трьома середніми циліндрами з п'яти. При цьому вимірювався перепад тиску на пучку.

Результати вимірювань зведені в таблицю 1. Ефект зменшення опору пучка спостерігається у випадку, коли довжина роздільної пластини достатня для того, щоби розділити бодай один вихор в стежці Кармана (таблиця 1). Подібні ефекти описані в роботах Інститута гідромеханіки НАН України [8]. Збільшення кількості роздільних пластин також позитивно впливає на зменшення опору пучка циліндрів.

Як видно з таблиці 1, найбільший опір спостерігається у циліндрів з гладкою поверхнею. Найкращий результат показали найдовші з розглянутих роздільних пластини ($L_p = 84$ мм)

Висновки

Комп'ютерне моделювання поперечного обтікання циліндра дало можливість з'ясувати причину виникнення вихорів, які утворюються при обтіканні циліндра і оцінити їх вплив на теплообмін і гідравлічний опір пучка циліндрів.

Для однорядного пучка циліндрів проаналізовано 3 способи впливу на теплообмін і гідродинаміку: 1 – утворення спіральної канавки з прямокутним перерізом на зовнішній поверхні циліндра, 2 – застосування спіральної канавки з овальним перерізом на зовнішній поверхні циліндра, 3 – встановлення роздільної пластини (спліттера) на задній поверхні циліндра.

Показано, що виходячи зі значень фактора аналогії Рейнольдса FAR , канавки з кроком 40 мм забезпечують збільшення тепловіддачі більше ніж в 2,5 рази в той час, коли газодинамічний опір пучка зменшується на 49 %. Трохи гірші показники у циліндрів з канавками з кроком 10 мм – при цьому зростання теплообміну досягало 96%, а зменшення газодинамічного опору – 16%. Порівняння виконувалось при $Re = 14500$. В цілому, циліндри з овальним перерізом канавок мають переваги над циліндрами, на поверхнях яких виконані канавки з прямокутним поперечним перерізом.

Табл. 1. Вплив роздільних пластин (спліттерів) на гідравлічний опір пучка циліндрів

	Розмір роздільної пластини, L_p мм	Кількість роздільних пластин	Перепад тиску, Па	Кількість перекритих вихорів	Тип калориметра
1		0	38		Smooth
2	25	1	26		SPI-20
3	67	1	24		SPI-20
4	84	1		1	SPI-20
5		0	39		Smooth
6	25	2	25		SPI-20
7	67	2	24		SPI-20
8	84	2	22	1	SPI-20
9		0	42		Smooth
10	25	3	23		SPI-20
11	67	3	21		SPI-20
12	84	3	20	1	SPI-20

3 Показано, що встановлення на кормовій твірній циліндра роздільної пластини (спліттера), помітно зменшує опір пучка. Використовувались 3 типи пластин довжиною $L_p = 25$ мм, 67 мм, 84 мм. Навіть одна пластина, яка була встановлена на середній циліндр, дещо зменшувала опір пучка.

ЛІТЕРАТУРА

1. Халатов А.А., Коваленко Г.В. Мейрис А.Ж. Сравнение различных способов интенсификации теплообмена на цилиндрических поверхностях. Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2013.3/12 (63). С.58 – 60.
2. Жукаускас А., Жюгжда И. Теплоотдача цилиндра в поперечном потоке жидкости.// Вильнюс. «МОК-СЛАС» 1979. - 235 с.
3. Мигай В.К., Фирсова Э.В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление пучков труб. Ленинград. Издательство «НАУКА» 1986.195 с.

4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Издательство «Наука», Москва, 1969. 742 с.

5. Халатов А.А., Коваленко Г.В., Мулярчук М.А. Теплоотдача при поперечном обтекании потоком воздуха однорядного пучка цилиндров со спиральными канавками разного поперечного перерізу. Теплофізика та теплоенергетика. 2023. Том 45. №3. С. 5-9.

6. Манеев А.П., Терехов В.И. Аэродинамика и теплообмен дымовых труб. – АНО Издательский Дом «Научное обозрение», 2017. –226 с.

7. Халатов А.А., Коваленко Г.В. Применение ледяных калориметров для исследования теплоотдачи поверхностей, формированных углублениями. Промышленная теплотехника. 2008. 30.№2. С.5-12.

8. Вовк И.В., Малюга В.С. Генерация автоколебаний при обтекании цилиндра с плоским сплиттером.

Доповіді Національної академії наук України. 2017. № 11. С.30-36.

THE FEATURES OF HEAT EXCHANGE AND HYDRODYNAMICS WHEN AIR FLOWS AROUND BEAMS OF CYLINDERS

A.A.Khalatov¹, G.V.Kovalenko², M.A.Mulyarchuk³

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Maria Kapnist, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine

¹*Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head of the Department, Artem.khalatov1942@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7659-4234>*

²*PhD, Senior Researcher, gkliashkova5@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1789-6918>*

³*Junior researcher, mariyamul997@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1789-3056>*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.1>

The purpose of the work is to evaluate various methods for intensifying heat transfer when air flows around bundles of cylinders while possibly minimizing pressure losses.

The results of experimental and theoretical studies of transverse air flow around a homogeneous bundle of cylinders are presented. The patterns of changes in the characteristics of heat transfer and aerodynamic resistance of a given cylinder bank under the conditions under consideration are analyzed. Based on computer modeling, the role of vortex structures in intensifying the heat transfer process is assessed. Data are presented on the effect of spiral grooves on the surface of the cylinders on the heat transfer coefficient and pressure loss. It is shown that the cross-section of spiral grooves also has a significant impact on the analyzed characteristics, while the oval cross-section leads to a greater intensification of heat transfer compared to grooves with a rectangular cross-section. It is noted that the sharpness of the edges plays a significant role when air exits the groove onto the surface of the cylinder. The results of experimental studies on the role of separating plates (splitters) on the aft surface of the cylinders are considered. It is shown that the presence, length and number of plates have a significant impact on the aerodynamic drag of the cylinder bank.

Bibl. 8, Fig. 5, table 1.

1. Khalatov A.A., Kovalenko G.V., Meiris A.Zh. Comparison of different methods for intensifying heat transfer on cylindrical surfaces. *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. 2013.3/12 (63). C.58 – 60. (in Rus).

2. Zhukauskas A., Zhugzhda I. Heat transfer of a cylinder in a transverse fluid flow. Vilnius. "MOKSLAS". 1979.- 235 p. (in Rus).

3. Migay V.K., Firsova E.V. Heat transfer and hydraulic resistance of pipe bundles. Leningrad. Publishing house "SCIENCE". 1986. 195 p. (in Rus).

4. Schlichting G. Boundary Layer Theory. Moscow Publishing house "SCIENCE" 1969.-742 p. (Rus).

5. Khalatov A.A., Kovalenko G.V., Mulyarchuk M.A. Heat transfer during transverse air flow around a single-row bundle of cylinders with spiral grooves of different cross-sections. *Thermal physics and thermal energy*. 2023. Volume 45. No. 3. P. 5-9. (in Ukr).

6. Maneev A.P., Terekhov V.I. Aerodynamics and heat transfer of chimneys. ASS Publishing House "Scientific Review", 2017. –226 p. (in Rus).

7. Khalatov A.A., Kovalenko G.V. Application of ice calorimeters to study the heat transfer of surfaces formed by depressions. *Industrial heating engineering*. 2008 30.№2. P.5-12.(in Rus).

8. Vovk I.V., Malyuga V.S. Generation of self-excited oscillations of the flow past a cylinder with a flat splitter plate. *Dopovidi. Nacionalnoi Akademii nauk Ukrainy*. 2017. № 11. P. 30-36. (in Rus).

Отримано 05.01.2024

Received 05.01.2024

Прийнято до друку 15.02.2024

Accepted for publication 15.02.2024