

УДК: 536.24:541.11

ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОДНО- ТА ДВОРЯДНОГО ПУЧКА ЦИЛІНДРІВ ЗІ СПІРАЛЬНОЮ КАНАВКОЮ НА ЗОВНІШНІЙ ПОВЕРХНІ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ ОБТІКАННІ ПОТОКОМ ПОВІТРЯ

Мулярчук М.А., Халатов А.А., академік НАН України, Коваленко Г.В., канд. техн. наук

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

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2022.2>

Наведено результати експериментального дослідження теплогідравлічної ефективності одно- та дворядного пучка круглих циліндрів зі спіральною канавкою на зовнішній поверхні при поперечному обтіканні повітрям. Аналіз виконаний в діапазоні зміни числа Рейнольдса від 6800 до 12000. Для однорядного пучка циліндрів Фактор Аналогії Рейнольдса більше одиниці для всіх чисел Рейнольдса, а для дворядного - тільки при $Re_D < 10000$. Висока теплогідравлічна ефективність обумовлена формуванням у кормовій зоні циліндрів вихрової структури зі структурами, що «переплітаються»

The results of an experimental study of the thermohydraulic efficiency of a single- and double-row beam of round cylinders with a spiral groove on the outer surface during transverse airflow are presented. The analysis was performed in the range of Reynolds number change from 6800 to 12000. For a single-row cylinder bundle the Reynolds Analogy Factor is more than one for all Reynolds numbers, and for a double-row - only at $Re_D < 10000$. High thermohydraulic efficiency is due to the formation in the aft zone of vortex structure cylinders with intertwined structures

Бібл. 6, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: атеплогідравлічна ефективність; спіральна канавка; поперечне обтікання; фактор аналогії Рейнольдса; вихрові структури, що «переплітаються».

ФАР – фактор аналогії Рейнольдса;

Eu – число Ейлера;

Re – число Рейнольдса;

 t – температура;RNG k- ϵ – модель турбулентності.

Вступ

Циліндри з круговим перерізом при поперечному обтіканні потоком повітря широко зустрічаються у різних технічних установках [1], [2]. При використанні циліндрів з круговим перерізом у теплообмінних апаратах у кормовій області формується парний вихор, який є джерелом високого теплообміну та значних втрат тиску. При цьому зростання гідравлічних втрат перевищує відповідне збільшення теплообміну [3], [4]. Тому велике значення має розробка нових поверхонь теплообміну з високою теплогідравлічною ефективністю, що характеризується Фактором Аналогії Рейнольдса (ФАР) та є відношенням інтенсифікації теплообміну (Nu/Nu_0) до витрат енергії на прокачування потоку (Eu/Eu_0).

В ІТТФ НАН України виконано великий цикл експериментальних та теоретичних досліджень у галузі нових поверхонь теплообміну з високими теплогідравлічними характеристиками. Було виявлено, що при використанні поверхневих заглиблень на поверхні круглого циліндра при поперечному обтіканні відбувається зміщення точки відриву вниз по потоку і формування специфічної вихрової структури, яка сприяє зниженню втрат тиску і

росту теплообміну. При цьому Фактор Аналогії Рейнольдса стає більше одиниці, що свідчить про випереджальне зростання теплообміну. Дослідження теплообміну та гідравлічного опору при обтіканні циліндрів з круговим перерізом зі спіральною канавкою на поверхні теплообміну, виконані в роботі [5], показали, що в даному випадку формування вихрової структури також сприяє випереджальному зростанню теплообміну. Однак причина високої теплогідравлічної ефективності такої поверхні досі не набула фізичного пояснення.

У цій роботі виконано аналіз теплогідравлічної ефективності одно- та дворядного пучка циліндрів з круговим перерізом зі спіральною канавкою на зовнішній поверхні при поперечному обтіканні повітрям. Для аналізу використані експериментальні дані з теплообміну та гідравлічного опору, представлені в роботі [5]. Фізична структура потоку визначалася на основі комп'ютерного моделювання за чисельного розв'язання системи рівнянь руху та енергії.

1. Об'єкти дослідження

В якості об'єктів дослідження в роботі [5] використовувалися одно- та дворядний пучки циліндрів (останні

розташовувались в шаховому порядку), фото циліндрів, що досліджувались, представлено на рис. 1. Діаметр кожного з циліндрів дорівнював 22 мм, їхня довжина – 220 мм, в свою чергу довжина робочої ділянки, що обдувалась поперечно потоком повітря, складала $L=105$ мм.

Однорядний або дворядний пучки складався з круглих циліндрів з одним типом канавки. Геометричні параметри циліндрів представлені в таблиці. Об'єкти дослідження виконані з нержавіючої сталі 1Х18Н9Т, виготовлялись на токарному верстаті в ІТТФ НАНУ. Товщина стінки циліндра 2 мм, на поверхні циліндра були сформовані спіральні канавки шириною 3 мм, глибиною 1,8 мм. Для визначення середньої тепловіддачі використовувався метод танення льоду, для визначення втрат тиску вимірювався розподіл тиску перед циліндрами та за ними. Детальний опис методики вимірювань теплообміну та гідравлічного опору наводиться у роботі [5].

2. Теплогідравлічна ефективність

У цій роботі Фактор Аналогії Рейнольдса ФАР визначався відношенням $(Nu/Nu_0)/(Eu/Eu_0)$, де Nu/Nu_0 – інтенсифікація теплообміну, а Eu/Eu_0 – збільшення гідравлічних втрат. Як базові значення використовувалися числа Нуссельта і Ейлера при поперечному обтіканні гладкого кругового циліндра (Nu_0 , Eu_0).

На рис. 2 представлені результати визначення теплогідравлічної ефективності однорядного пучка циліндрів зі спіральною канавкою для чисел Рейнольдса 6800, 8000, 12000. Відповідно до рекомендації [6] абсолютна величина ФАР визначалася залежно від відношення Eu/Eu_0 . Отже для всіх циліндрів величина ФАР більша за одиницю і значно перевищує величину ФАР для однорядного пучка гладких циліндрів. Для зразка SPI_40 він у середньому дорівнює 1.5, для зразка SPI_10 – 1.63 та для зразка SPI_20 – 1.25.

Таблиця

№	Позначення	Кількість канавок	Крок спіралі t , мм	Відносний крок спіралі t/D
1	Sm	0		
2	SPI_10	1	10,0	0,45
3	SPI_20	1	20,0	0,91
4	SPI_40	1	40,0	1,82
5	SPI_20_2	2	20,0	0,91



Рис. 1. Фото циліндрів, з однією спіральною канавкою на зовнішній поверхні:
1 – циліндр з гладкою поверхнею; 2, 3, 4 – циліндри зі спіральними канавками, крок спіралі:
2 – 10 мм ; 3 – 20 мм ; 4 – 40 мм

Занижений результат для канавки з кроком 20 мм в порівнянні з іншими канавками пов'язаний з невеликою інтенсифікацією теплообміну. Таким чином, для всіх досліджених зразків інтенсифікація теплообміну випереджає зростання втрат тиску, що характеризує високу теплогідрравлічну ефективність однорядного пучка з гвинтовими канавками на зовнішній поверхні.

Для дворядного пучка циліндрів результати визначення теплогідрравлічної ефективності представлені на рис. 3 ($Re_D = 6800, 8000, 12000$). Отже, при обтіканні дворядного пучка циліндрів в залежності від числа Рейнольдса теплогідрравлічна ефективність пучка може бути як меншою, так і більшою за одиницю. Для всіх чисел Рейнольдса найкращі показники теплогідрравлічної

ефективності демонструє дворядний пучок циліндрів SPI2_20_2 з двома канавками на зовнішній поверхні та кроком 20 мм. Таким чином, і в даному випадку за певних умов можливі умови випереджаючого зростання теплообміну порівняно зі зростанням гідрравлічних втрат.

3. Комп'ютерне моделювання

Для визначення фізичної причини високих значень теплогідрравлічної ефективності виконано комп'ютерне моделювання гідродинаміки та теплообміну повітряного потоку при обтіканні однорядного пучка циліндрів з кроком 20 мм SPI_20 (табл). При комп'ютерному моделюванні вихрових потоків важливе значення має

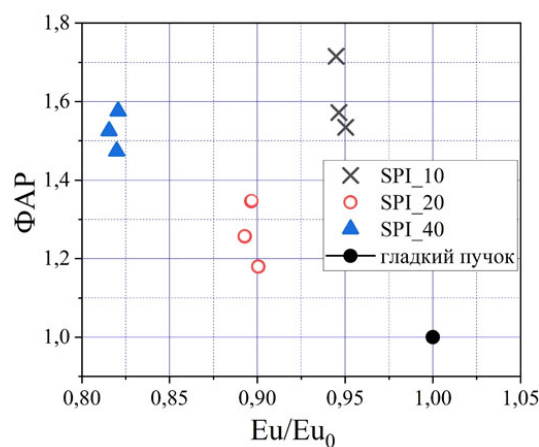


Рис. 2. Теплогідрравлічна ефективність однорядного пучка циліндрів зі спіральними канавками на зовнішній поверхні з різним кроком (пояснення позначень представлені в таблиці)

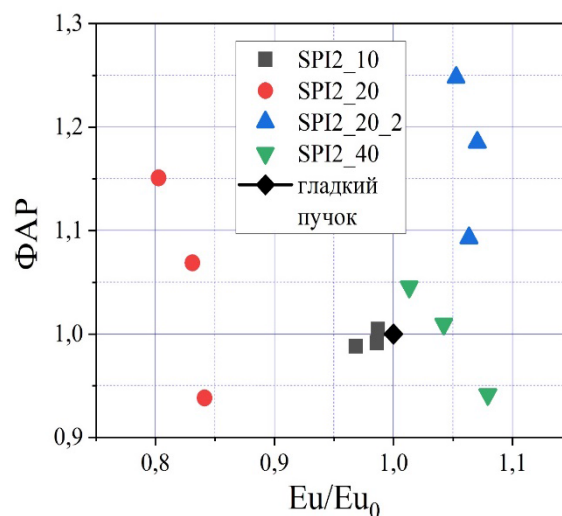


Рис. 3. Теплогідрравлічна ефективність дворядного пучка циліндрів зі спіральними канавками на зовнішній поверхні з різним кроком (пояснення позначень представлені в таблиці)

точність розрахунку внаслідок формування вихрового потоку між циліндрами та в їх кормовій частині. Тому в якості об'єкту дослідження вибрано однорядний пучок SPI_20 (табл.) з невисокою вихровою структурою, що визначається незначної інтенсифікацією теплообміну і значним зменшенням опору. Як впливає (рис. 2), теплогидравлічна ефективність пучка SPI_20 складає 1.18...1.35, тобто є найменшою в порівнянні з іншими однорядними пучками, що досліджувались в роботі.

Дискретизація розрахункової області проводилась у вбудованому редакторі сіток ANSYS Mesh. На поверхні стінки були створені шари з призматичних елементів, які дозволяють якісно описати процеси, що відбуваються в приміжовому шарі та в канавці. Основними параметрами дискретизації розрахункової області були: число шарів з призматичних елементів, яке дорівнювало 10, і фактор приросту цих шарів, рівний 1.05. Максимальний розмір чарунки дорівнював 5 мм. Граничні умови приймалися симетричними.

В якості граничних умов задавались постійна і рівномірна по висоті швидкість потоку перед пучком циліндрів, атмосферний тиск на виході з пучка (10^5 Па) і температура повітря на вході (22°C). Теплофізичні властивості повітря задавались за допомогою емпіричних рівнянь. Для поверхні циліндрів ставились граничні умови першого роду – $t = 0^\circ\text{C}$, на інших сторонах каналу ставились симетричні граничні умови. Точність розрахунків задавалась до п'ятого знаку для основних параметрів (при відсутності змін в п'ятому знаку між послідовними ітераціями розрахунок зупи-

нявся). Для дослідження використовувався метод числового розв'язання рівнянь руху та нерозривності, та енергії з використанням пакету прикладних програм ANSYS CFX.

При тестуванні проаналізовані три моделі турбулентності – RNG $k-\varepsilon$, LRR і SSG, які показують надійні результати при моделюванні вихрових потоків. Результати моделювання порівнювались з результатами експериментального дослідження середнього теплообміну при поперечному обтіканні однорядного пучка циліндрів зі спіральною канавкою SPI_20 [5]. Аналіз чутливості показав, що задовільне узгодження з експериментальними даними при обтіканні циліндра з канавкою досягається при використанні сітки з кількістю елементів 11.5 млн. Результати верифікації показали, що найменше розходження з експериментом спостерігається у моделі RNG $k-\varepsilon$ (3.4% при максимальному числі Рейнольдса $Re_D = 15800$). Дві інші моделі демонструють занижені результати - для всього діапазону чисел Рейнольдса середня різниця для обох моделей турбулентності в порівнянні з експериментальними даними становила приблизно 15%.

4. Результати комп'ютерного моделювання

Як відомо, в області $Re_D = 10000 \dots 20000$ за гладкими циліндрами виникають два симетричні вихори, які утворюють вихрову доріжку. При невеликих числах Рейнольдса (як у цій роботі) на передній області циліндра формується ламінарний приміжовий шар, який відривається від поверхні циліндра при куті приблизно 82° . Довжина відривної зони становить кілька діаметрів.

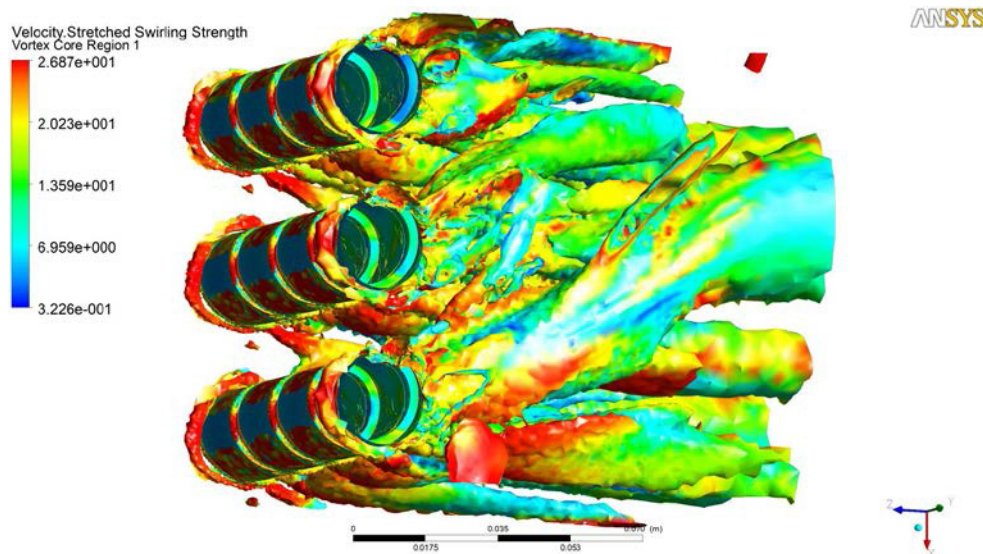


Рис. 4. Вихрова структура при обтіканні одного ряду циліндрів з гвинтовою канавкою на зовнішній поверхні ($Re_D = 10\ 000$)

Таким чином, на поверхні гладкого циліндра при числах Рейнольдса, характерних для цього дослідження, має місце ламінарна і відривна структури потоку.

Розрахунки показують, що обтікання одного ряду циліндрів зі спіральною канавкою на поверхні має складнішу структуру (рис. 4). Це пов'язано з тим, що різні області поверхні циліндрів обтікаються по-різному. Одна частина потоку обтікає лише гладку частину циліндра між канавками, залишаючись ламінарною та відривною за схемою обтікання гладкого циліндра; у той час як інша частина «зустрічається» з гвинтовою канавкою на різних відстанях від лобової точки та переходить у турбулентну структуру за нею. Деяка частина потоку формує закручений струмінь у канавці, який при

певних кутах обтікання викидається з нього за рахунок відцентрової сили. Це викиди чітко помітні на рис. 4.

Комп'ютерна візуалізація обтікання одного ряду циліндрів зі спіральною канавкою в центральному перерізі та на відстані 13 мм вниз від центру представлена на рис. 5 і 6. Аналіз показує відмінність у картині обтікання, що з різною відстанню «зустрічі» потоку з гвинтовою канавкою. В обох випадках кут відриву істотно зростає в порівнянні з гладким циліндром і більш характерний для обтікання гладкого циліндра при великих числах Рейнольдса. Таким чином, після взаємодії з гвинтовою канавкою потік стає турбулентним. У сліді за циліндрами лінії струму спрямовані всередину потоку, що особливо добре видно на рис. 6.

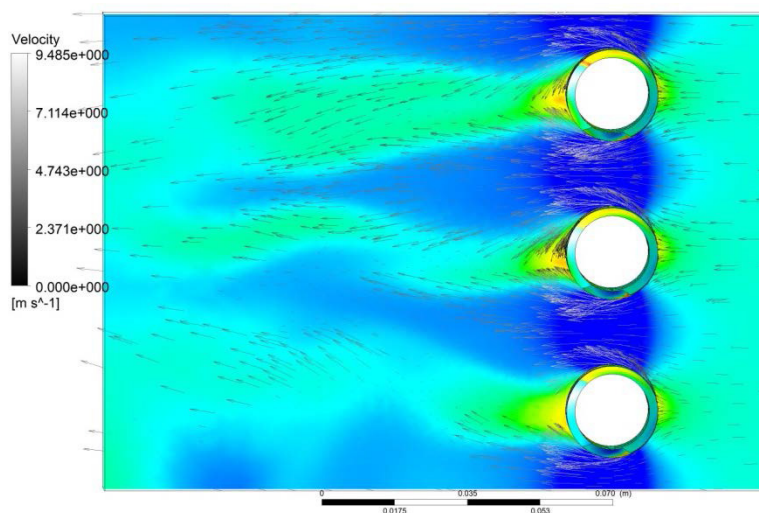


Рис. 5. Обтікання одного ряду циліндрів. Площина візуалізації через середину висоти циліндрів ($Re_D=10\,000$)

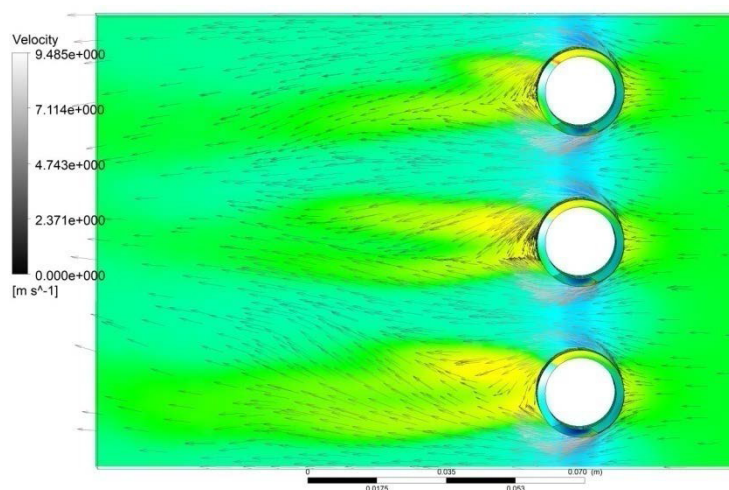


Рис. 6. Обтікання одного ряду циліндрів. Площина візуалізації на відстані 13 мм вниз від центру висоти циліндрів ($Re_D=10\,000$)

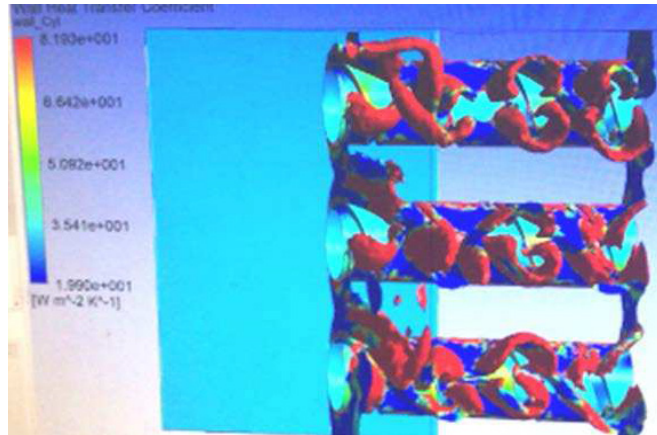


Рис. 7. Вихрова структура потоку за одним рядом циліндрів зі спіральною канавкою ($Re_D=10\,000$)

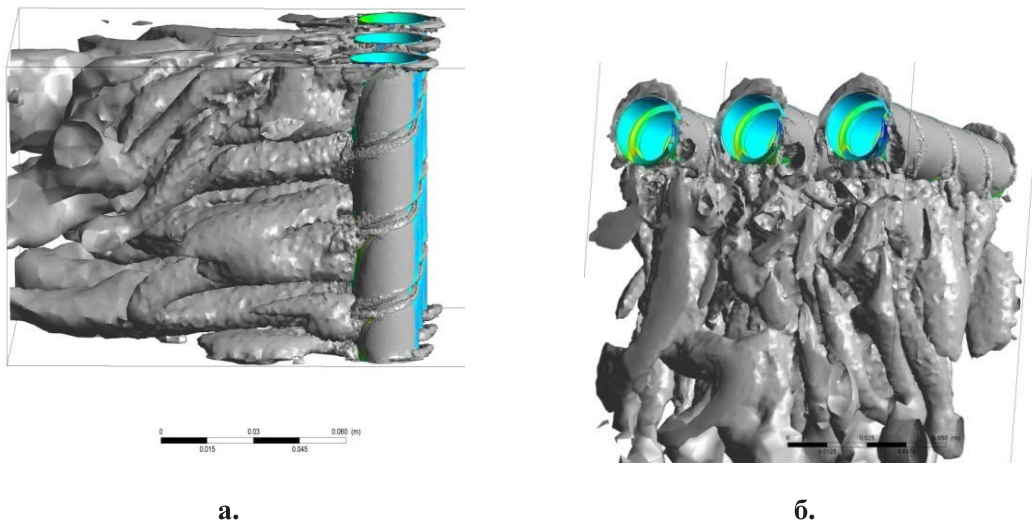


Рис. 8. Структура вихроутворення за одним рядом циліндрів ($Re = 10000$)

Результати моделювання вихрової структури в області за циліндрами, представлені на рис.7, показують, що за циліндрами зі спіральною канавкою вихрові структури «переплітаються» одна з одною, формуючи вихрову структуру принципово нового типу.

Детальний аналіз вихрової зони за циліндрами (рис. 8) показує, що в ній утворюються 2 види вихрових структур. Канавка, яка проходить в зоні між циліндрами, провокує утворення довгих «мотузкоподібних» вихорів, по яким рухаються «муфтоподібні» вихори. Так як вихори різних розмірів і форми і в них різна швидкість, то слід очікувати, що вони продукуватимуть як мінімум дві частоти флуктуацій потоку. В області між циліндрами в зоні, де проходить канавка, довгі вихрові структури

підвищують теплообмін на гладких ділянках сусідніх циліндрів. Структура вихроутворення за одним рядом циліндрів зі спіральними канавками практично відповідає структурі вихроутворення за одиночним циліндром зі спіральною канавкою на поверхні [5].

Таким чином, вихрова структура за одним рядом циліндрів зі спіральною канавкою принципово відрізняється від структури обтікання гладкого циліндра, що сприяє зниженню гідравлічних втрат у порівнянні з обтіканням гладких циліндрів. Зовнішній потік не завихрюється як за гладким пучком, а рухається по поверхні «муфтоподібних» вихорів з низькими втратами тиску. Тому при обтіканні циліндрів зі спіральною канавкою втрати тиску для конфігурації SPI_20 приблизно на 10% менше, ніж при обтіканні гладкого пучка.

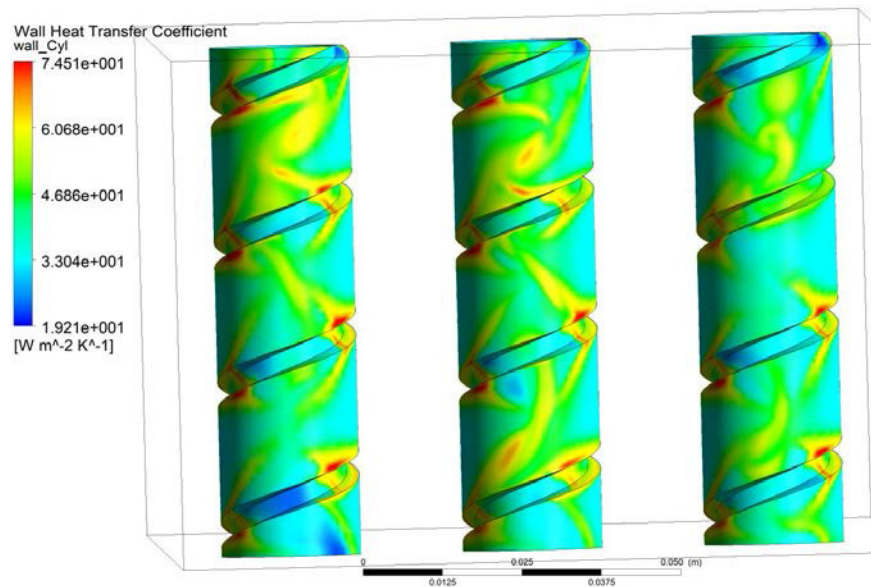


Рис. 9. Тепловіддача у кормовій області циліндрів ($Re_D=10000$)

Результати визначення тепловіддачі в кормовій області циліндрів із спіральною канавкою представлені на рис. 9. У вихровій ділянці на поверхні циліндрів видно області високого теплообміну жовтого кольору. Ці області розташовуються як у зрізі канавок, і у кормовій області циліндрів. У кормовій ділянці поверхні високого теплообміну пересікаються між собою, що зумовлено «переплетенням» вихрових структур (рис. 7).

Взаємодія закручених струменів, що виходять із канавок сусідніх циліндрів, також сприяють інтенсифікації теплообміну на поверхні циліндрів. Експериментальне дослідження [5] показало, що для конфігурації, що розглядається (SPI_20) збільшення середнього теплообміну склало більше 20% порівняно з пучком гладких циліндрів. В цілому, за рахунок зниження гідравлічних втрат при обтіканні пучка циліндрів приблизно на 10% теплогідравлічна ефективність становила понад 30%. Слід очікувати, що чим більший крок канавки, тим більша відстань між сусідніми струменями і тим більшу поверхню буде охоплювати вихор, утворений на задній поверхні циліндра.

Отримані результати показують, що при використанні теплообмінних поверхонь зі спіральними канавками треба віддавати перевагу пучку циліндрів з асиметричним розташуванням канавок. Якщо положення циліндрів з нанесеними на їх поверхні канавками ідентичні, вихори від сусідніх циліндрів можуть перешкоджати один одному при невеликих кроках їх розміщення в пучку. Це може бути причиною переваги тепловіддачі у циліндричних поверхнях з однозахідними канавками над подібними поверхнями з двозахідними.

Висновки

1. Основною причиною зниження опору в однорядному пучку циліндрів зі спіральною канавкою є формування вихрових структур, що «переплітаються» за циліндрами. В цьому випадку зовнішній потік не формує парний вихор у кормовій ділянці як у гладкому пучку, а рухається по поверхні «муфтоподібних» вихорів, що забезпечує низькі втрати тиску.

2. Високий теплообмін у кормовій області циліндрів та взаємодія вихрових структур на бокових поверхнях сусідніх циліндрів сприяють високому рівню середнього теплообміну на поверхні циліндрів зі спіральними канавками порівняно з однорядним пучком гладких циліндрів.

3. Особливості вихрової структури та теплообміну біля циліндрів зі спіральними канавками на поверхні визначають високий фактор теплогідравлічної ефективності та випереджальний ріст теплообміну порівняно із збільшенням гідравлічних втрат.

4. Отримані результати дозволяють висловити припущення, що у дворядному пучку циліндрів при низьких числах Рейнольдса ($Re_D < 10\,000$) діє такий самий механізм інтенсифікації теплообміну та зниження втрат тиску, що сприяє фактору теплогідравлічної ефективності більше одиниці.

5. Розглянутий тип теплообмінної поверхні має великий практичний інтерес при розробці теплообмінних апаратів з високими теплогідравлічними характеристиками.

ЛІТЕРАТУРА

1. Жукаускас А., Жюгжда И. Теплоотдача цилиндра в поперечном потоке жидкости // Вильнюс. «МОКСЛАС» 1979. - 235 С.
2. Мигай В.К., Фирсова Э. В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление пучков труб. Ленинград. Издательство «НАУКА» 1986. 195 С.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Москва. Издательство «НАУКА» 1969. – 742 С.
4. Манеев А. П., Терехов В. И. Аэродинамика и теплообмін димовых труб. «Научное обозрение» <http://russian-science.info>.
5. Khalatov A.A., Kovalenko G.V., Muliarchuk M.A. Research of hydrodynamics and heat transfer during the transverse air flow of a row of cylinders with screw grooves // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, – 2020. – № 3/8. (105), С. 39 – 45.
6. Халатов А.А, Доник Т.В. Новый критерий теплогидравлической эффективности интенсификаторов теплообмена. Доповіді Національної академії наук України, 2014.

THERMAL HYDRAULIC EFFICIENCY OF ONE AND TWO-ROW BUNCH OF CYLINDERS WITH A SPIRAL GROOVE ON THE OUTER SURFACE WITH TRANSVERSE FLOW

Mulyarchuk M.A., Khalatov A.A., Kovalenko G.V.

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.2>

The results of experimental study of thermohydraulic performance of a single- and double-row of bundle of round cylinders with screw groove on the external surface at the air cross-flow are presented. The analysis was performed at the Reynolds number range from 6800 to 12000. For a single-row bundle the Reynolds Analogy Factor is more than unity for all Reynolds numbers studied, while for the double-row of cylinders it is over the unity at $Re_D < 10000$. The high thermohydraulic performance is due to the formation of the «interwined vortex structures» in the back cylinder zone. The obtained results show that when using heat exchange surfaces with spiral grooves it is necessary to prefer a beam of cylinders with an asymmetric arrangement of grooves. If the positions of the cylinders with grooves on their surface are identical, vortices from adjacent cylinders may interfere with each other in small steps of their placement in the beam. This may be the reason for the advantage of heat transfer in cylindrical surfaces with one-west grooves over similar surfaces with two-west.

References 6, tables 1, figures 9.

1. Zhukauskas A., Zhyugzhda I. Heat transfer of a cylinder in a transverse fluid flow.// Vilnius. "MOKSLAS" 1979. - 235 S.

2. Migay V.K., Firsova E.V. Heat exchange and hydraulic resistance of tube bundles. Leningrad. Publishinghouse "NAUKA" 1986.195 S.

3. Schlichting G. Theory of the boundary layer. Moscow. Publishinghouse "NAUKA" 1969. - 742 p.

4. Maneev A. P., Terekhov V. I. Aerodynamics and heat exchange of smoke pipes. "ScientificReview" <http://russian-science.info>.

5. Khalatov A.A., Kovalenko G.V., Muliarchuk M.A. Research of hydrodynamics and heat transfer during the transverse air flow of a row of cylinders with screw grooves // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, – 2020. – № 3/8. (105), С. 39 – 45.

6. Khalatov A.A., Donyk T.V. A new criterion of thermohydraulic performance of heat transfer intensifiers. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2014.

Отримано 20.04.2022

Received 20.04.2022