

УДК 536.24:541.11

ТЕПЛОВІДДАЧА ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ ОБТІКАННІ ПОТОКОМ ПОВІТРЯ ОДНОРЯДНОГО ПУЧКА ЦИЛІНДРІВ ЗІ СПІРАЛЬНИМИ КАНАВКАМИ РІЗНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ

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

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. М. Капніст 2а, м. Київ 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2023.1>

Наведено результати експериментального дослідження тепловіддачі та гідравлічного опору однорядного пучка кругових циліндрів зі спіральними канавками на зовнішніх поверхнях у потоці повітря при поперечному обтіканні. В діапазоні зміни числа Рейнольдса від 3000 до 16000 виконано порівняльний аналіз результатів для прямокутної та овальної спіральних канавок. Розглянуто вплив кроку розташування спіральних канавок на теплообмін однорядного пучка циліндрів.

The results of an experimental study of heat transfer and hydraulic resistance of a single-row bundle of circular cylinders with spiral grooves on the outer surfaces in an air flow with a transverse flow are presented. In the Reynolds number range from 3000 to 16000, a comparative analysis of the results of rectangular and oval spiral grooves was performed. The effect of the spacing of the spiral grooves on the heat transfer of a single-row cylinder bundle is considered.

Бібл. 8, рис. 5.

Ключові слова: тепловіддача, гідравлічний опір, однорядний пучок, круговий циліндр, теплогідравлічна ефективність.

Eu – число Ейлера;

Nu – число Нуссельта;

Re – число Рейнольдса;

S – крок спіральної канавки;

FAR – фактор аналогії Рейнольдса.

Вступ

Поперечне обтікання пучка циліндрів газом широко застосовується в техніці. Можливо, одним з перших застосувань пучка циліндрів був англійський патент 1827 року. Специфіку вносять різні фізичні властивості теплоносіїв. Сучасні галузі промисловості, медицина, космічні дослідження, військові зацікавлені в зменшенні габаритів теплообмінників. Підвищення кількості теплоти, що передається, досягається як збільшенням теплообмінної поверхні, (наприклад застосуванням ребер), так і інтенсифікацією самого процесу передачі теплоти [1, 2]. Організація канавок на зовнішніх поверхнях циліндра є простою і розповсюдженою операцією для інтенсифікації цього процесу [3, 4]. Однак інтерес до дослідження обтікання циліндрів стисливим середовищем зберігся до 20-го століття [5, 6]. Наразі продовжується вивчення гідродинаміки, зокрема, точок відриву потоку, утворення вихорів, впливу шорсткості поверхні, звуку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Детальний аналіз теплообміну та гідродинаміки при поперечному обтіканні пучків циліндрів висвітлено в циклі робіт [4, 5]. Однак в цих дослідженнях в основному обмежуються випадками застосування гладких циліндричних поверхонь. Виключенням можуть бути шорсткі поверхні [6, 1] або поверхні з асиметрією [7].

З аналізу літературних джерел випливає, що використання в теплообмінниках поверхонь, що відрізняються від гладких, може бути перспективним.

Мета роботи полягає у експериментально-теоретичному дослідженні гідродинамічних та теплообмінних процесів при обтіканні пучка труб зі спіральними канавками різної геометрії при їх поперечному обтіканні потоком повітря.

Методи досліджень. В роботі як об'єкт дослідження розглядалися циліндри-калориметри, на зовнішніх поверхнях яких мають місце спіральні канавки. Канавки відрізнялися кроком розташування на поверхні циліндра.

Як метод дослідження застосовувався калориметричний метод танення льоду [8].

Калориметри були виготовлені зі сталі 1Х18Н9Т, зовнішній діаметр яких – 22 мм, внутрішній – 16 мм. Досліди виконувались в прямому каналі загальною довжиною 1780 мм і прямокутним поперечним перерізом 182 x 120 мм. На вході в робочу ділянку встановлювався хонейкомб з 216 тонкостінних трубочок з діаметром 10 мм. Пучки циліндрів розміщувались поперек потоку повітря з кроком 38 мм. Діапазон чисел Рейнольдса складав від 4000 до 16000. Температура повітря, що набігало

знаходилась в межах 10°C - 23°C . Перед дослідом в калориметр наливалась порція дистильованої води, далі калориметри поміщались в морозильну камеру для утворення льоду. Циліндри-калориметри з льодом встановлювались в робочу ділянку, де вони обтікались повітрям вимірюваний відрізок часу. Лід частково танув, а кількість утвореної води вимірювалась бюреткою. Методика обробки показань калориметрів докладно описана в [9].

Більшість досліджених теплообмінних поверхонь утворені на основі труб, на зовнішній поверхні яких вирізані спіральні канавки. (Для порівняння використовувались гладкі трубки).

Одночасно виконувалося розв'язання балансних рівнянь для визначення коефіцієнту тепловіддачі і гідравлічного опору.

Результати досліджень.

Фактор аналогії Рейнольдса залежить від декількох геометричних параметрів, зокрема, від умов виходу повітря з канавки на поверхню циліндра. (Дані комп'ютерного моделювання задачі, що розглядається, наведено на рис. 1).

По кольоровому позначенні швидкостей видно, що вертикальні вихори обертаються. Значення чисел Нуссельта і Ейлера дозволяють вираховувати фактор аналогії Рейнольдса і поставити його в залежність від відносного числа Ейлера (рис. 2). Плоскі бічні стінки канавок та їх товщина провають появу дискретних закручених

виходів повітря з канавок. Цим вони сприяють фактичному зменшенню активної теплообмінної поверхні.

На рис. 2 наведено значення фактору аналогії Рейнольдса для циліндрів зі спіральними канавками з прямокутними поперечними перерізами при різних кроках розташування канавок ($S=40\text{мм}$, $S=20\text{мм}$, $S=10\text{мм}$). Для порівняння на цьому ж рисунку представлено відповідні дані для гладкого циліндра і для циліндра зі спіральною канавкою овального поперечного перерізу з кроком 10 мм .

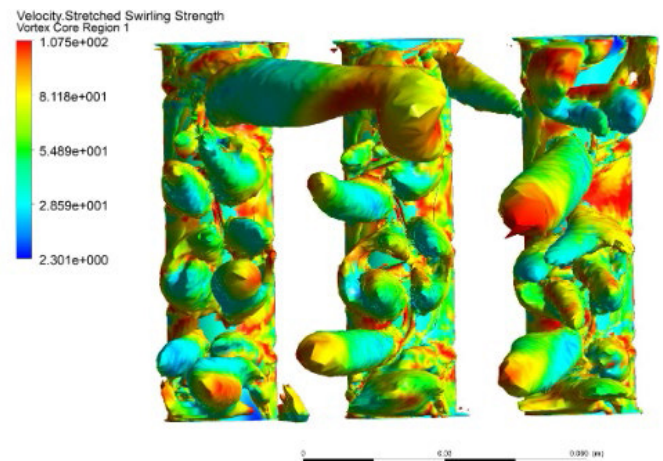


Рис. 1. Вихрові утворення повітря на задній поверхні циліндрів зі спіральними канавками, що обтікаються повітряним потоком

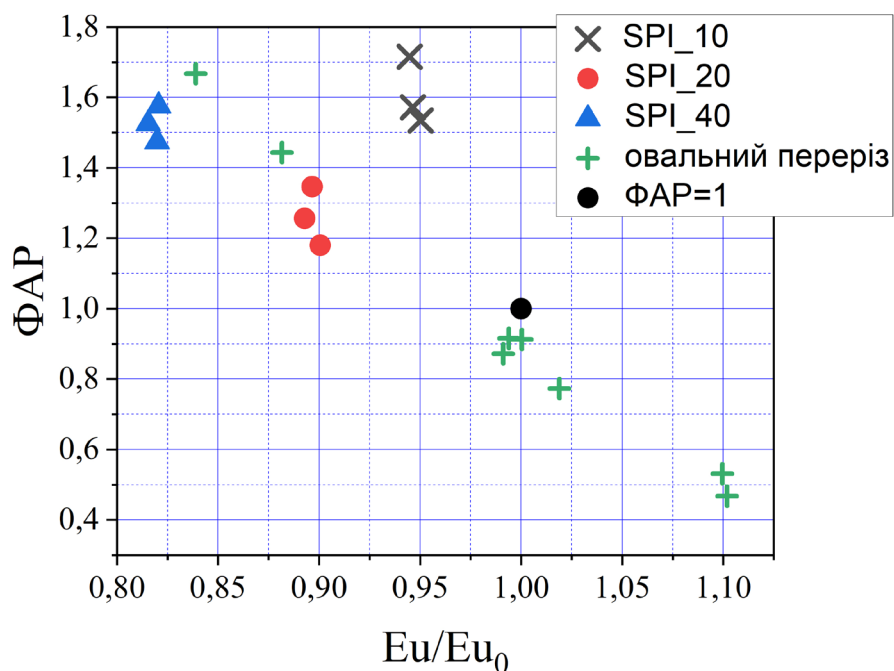


Рис. 2. Залежність фактору аналогії Рейнольдса від відносного числа Ейлера

Відкриті сторони канавок спрямовують повітря безпосередньо в прилеглий шар, чим викликають збільшення фактору аналогії Рейнольдса. Для циліндра з кроком канавки 20 мм це збільшення становить приблизно 20% порівняно з випадком гладких циліндрів. Циліндр з спіральними канавками з кроком 40 мм має найменший відносний опір, а циліндр з канавками з кроком 10 мм – найбільший.

Заміна канавок з прямокутним перерізом на канавки з викривленими бічними стінками може змінити гідралічний опір пучка циліндрів. На рис. 3 показано один з варіантів такої конструкції. Тут ϕ_i – кут загострення краю канавки.

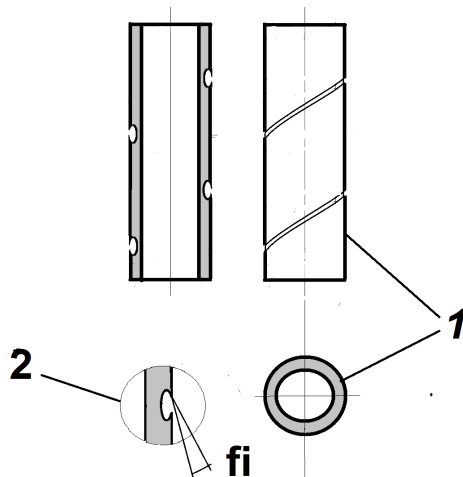


Рис. 3. Круговий циліндр з канавками овального поперечного перерізу: 1 – зовнішній вигляд і поперечний переріз калориметра; 2 – поздовжній переріз калориметра

На застосування вказаного елемента конструкції одержано патент [3].

Як видно з рис. 2, при застосуванні канавки з овальним перерізом інтенсифікація тепловіддачі спостерігається при числах Re не більших від 5500 [2]. При цьому спостерігається більша тепловіддача ніж при застосуванні канавок з прямокутним поперечним перерізом з кроками 20 мм і 40 мм. Це може бути пояснено змінами в положенні точок відриву потоку, викликаними загостренням країв стінок овальних канавок.

Вихід повітря з канавок на зовнішню поверхню циліндрів є багатфакторним процесом. Внаслідок того, що канавки спіральні, перші порції повітря виходять під одним кутом, а наступні під іншим, тому що канавка «в'ється» навкруги циліндра. В результаті відбувається закручування струменя повітря, яке залежить від умов обтікання циліндра, кроку спіральної канавки і особливостей геометрії щілини виходу [2].

З однієї сторони канавки утворюють додаткову площу теплообміну, з іншої – малий крок канавок може викликати таке близьке сусідство вихорів, які утворюються на зовнішній поверхні, що вони починають заважати один одному. В зв'язку з цим гострота країв канавок може бути фактором додаткової інтенсифікації теплообміну [3].

На рис. 4 наведено зміни числа Нуссельта в залежності від числа Рейнольдса для двох варіантів циліндрів з різними канавками на їх зовнішній поверхні. В одному варіанті – канавка з прямокутним перерізом, в іншому – зі скругленими бічними стінками канавки.

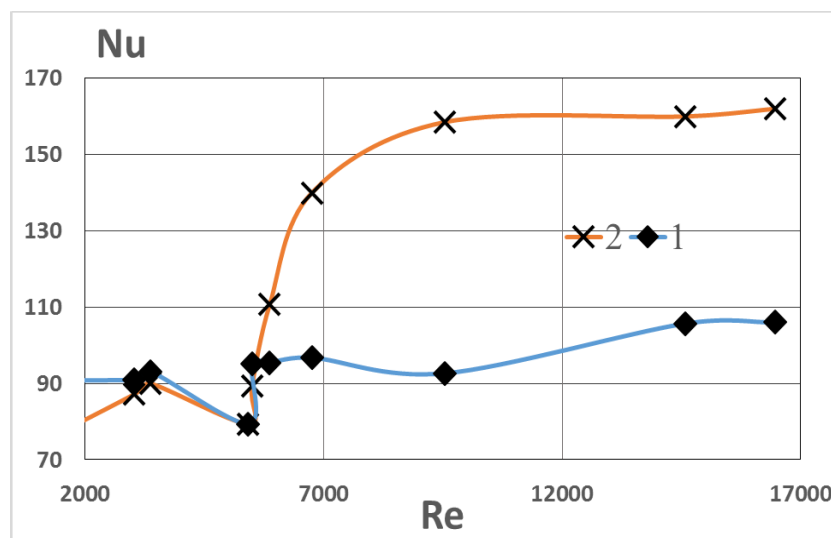


Рис. 4. Залежність числа Нуссельта від числа Рейнольдса для кругових циліндрів з кроком канавки 10 мм: 1 – овальні канавки, 2 – прямі бічні стінки канавок

Як видно з рис. 4, середній коефіцієнт тепловіддачі в дослідженому діапазоні має немонотонну залежність від числа Рейнольдса. В діапазоні зміни числа Рейнольдса від 3000 до 4500 числа Нуссельта для двох варіантів, що розглядаються, мало відрізняються. Далі зі збільшенням числа Рейнольдса коефіцієнт тепловіддачі для варіанта канавки з плоскими бічними стінками зростає більш інтенсивно, ніж у варіанті зі скругленими бічними стінками канавки. Переваги по теплообміну циліндра з плоскими бічними стінками канавок в даному діапазоні чисел Рейнольдса можна пояснити більшим опором, який створюють загострені краї канавок, що повернуті всередину один навпроти одного.

Залежність гідравлічного опору однорядного пучка циліндрів від швидкості повітряного потоку представлена на рис. 5.

Результати, наведені на рис. 5, свідчать про те, що число Ейлера зі збільшенням числа Рейнольдса зменшується для обох варіантів виконання канавок. Причому в діапазоні зміни числа Рейнольдса від 3000 до 4500 більші значення гідравлічного опору мають місце в ситуації плоских бічних стінок канавок. Далі зі зростанням числа Рейнольдса від 4500 до 9500 значення чисел Ейлера для порівнюваних варіантів відрізняються незначно. При подальшому збільшенні числа Рейнольдса відбувається інверсія – гідравлічний опір канавок з прямокутним перерізом стає нижчим, ніж канавок зі скругленими бічними стінками. Це може бути пояснено тим,

що загострені краї овальних канавок направляють частину повітря назустріч потоку, який обтікає протилежний край канавки, і ця взаємодія стає більш помітною при більших швидкостях потоку повітря.

Висновки

1. Виконано аналіз теплообміну і гідродинаміки при обтіканні пучка циліндрів з канавками потоком повітря. Розглянуто два типи спіральних канавок на поверхні циліндрів. Для циліндрів з канавками прямокутного перерізу показано, що найкращі результати по теплообміну було одержано для кроків розташування канавок 10 мм і 40 мм. Циліндри з кроками канавок 20 мм виявились за ефективністю посередині між циліндрами з канавками 40 мм і гладкими циліндрами. Даний факт може бути зумовлений особливостями утворення вихорів на задній поверхні циліндра.

2. Досліджено вплив геометрії канавок на гідравлічний опір і коефіцієнт тепловіддачі. Встановлено, що плоскі бічні стінки канавок створюють більший опір, ніж вигнуті, в діапазоні зміни числа Рейнольдса від 3000 до 4500. Показано, що залежність коефіцієнта тепловіддачі від швидкості повітря має немонотонний характер. При цьому застосування циліндрів з канавками з прямими бічними стінками призводить до збільшення тепловіддачі в діапазоні чисел Рейнольдса $7000 < Re < 16000$. При застосування спіральних канавок з овальним перерізом більший ефект по тепловіддачі досягається на малих швидкостях повітря (при відносних числах Ейлера менших за одиницю)

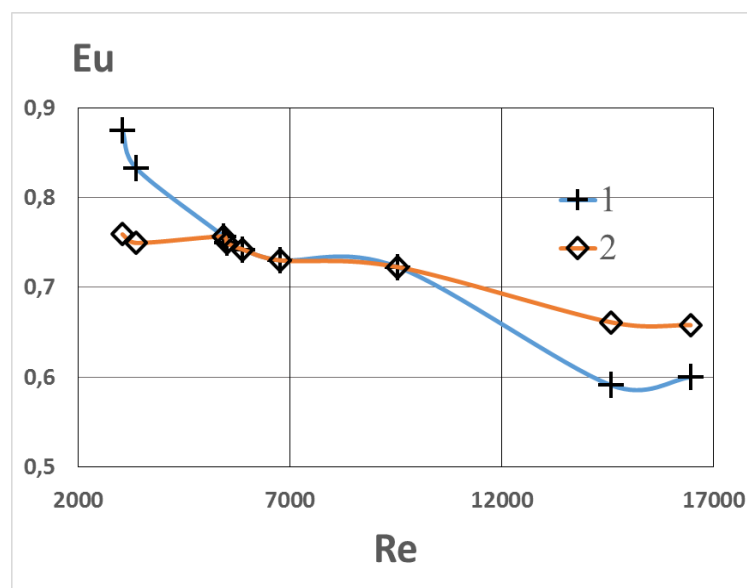


Рис. 5. Залежність числа Ейлера від числа Рейнольдса для кругових циліндрів з кроком канавки 10 мм: 1 – плоскі бічні стінки канавки, 2 – овальні канавки

ЛІТЕРАТУРА

1. Мейрис А. Ж., Коваленко Г. В. Сравнение различных способов интенсификации теплообмена на цилиндрических поверхностях. Восточно-европейский журнал передовых технологий. 3/12 (63). 2013. С. 58 – 60.
2. Коваленко Г. В. Энергетическая выгодность интенсификации теплообмена в пучках труб с помощью лунок. Международная научно-практическая конференция “Региональные проблемы энергосбережения в производстве и потреблении энергии”. 25-29 октября 1999, Украина, Киев. С. 107-108.
3. Халатов А. А. Северин С. Д. Коваленко Г. В. Бурлака В. В. Мейрис А. Ж. Применение трубчатых теплообменных поверхностей типа «углубление-выступ» в теплообменниках газотурбинных установок. Промышленная теплотехника. Т. 36. № 5. 2014. С. 34-45
4. Жукаускас А., Жюгжда И. Теплоотдача цилиндра в поперечном потоке жидкости. Вильнюс.: «МОК-СЛАС». 1979. 235 с.
5. Мигай В.К., Фирсова Э. В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление пучков труб. Ленинград.: Издательство «НАУКА». 1986.195 с.
6. Халатов А. А. Коваленко Г. В., Кобзар С. Г., Коваленко О. С., Мулярчук М. А. Патент України. А 202008153. Пристрій для видалення продуктів згорання первинного генератора теплоти.
7. Халатов А. А. Коваленко Г. В., Мейрис А. Ж. Теплоотдача при поперечном обтекании воздухом трубы с искусственной асимметрией. Промышленная теплотехника. Т. 39 , № 4 2017. С. 27 – 32.
8. Халатов А. А. Коваленко Г. В. Применение ледяных калориметров для исследования теплоотдачи поверхностей, сформированных углублениями. Промышленная теплотехника. Т. 30. № 2. 2008. С. 5 - 12.

HEAT TRANSFER DURING TRANSVERSE AIR FLOW AROUND A SINGLE-ROW BUNDLE OF CYLINDERS WITH SPIRAL GROOVES OF VARIOUS CROSS SECTIONS

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

¹Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head of the Department, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, st. Maria Kapnist 2a, Kyiv, Ukraine, 03057
E-mail: Artem.Khalatov1942@gmail.com, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-7659-4234>

²PhD (Engin.), Senior Researcher, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Maria Kapnist 2a, Kyiv, Ukraine, 03057,
E-mail: gkliashkova5@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1789-6918>

³Junior Researcher, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Maria Kapnist 2a, Kyiv, Ukraine, 03057 E-mail: mariyamul997@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1789-3056>

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2023.1>

Summary

The aim of the work was to study the heat transfer and hydraulic resistance of a single-row bundle of cylinders with spiral grooves of various types on the outer surfaces. The task was to compare the heat transfer and hydraulic resistance of cylinders with spiral grooves with a rectangular cross section and grooves with an oval cross section in a cross-sectional air flow. The experiments were carried out in an open-type wind tunnel in the range of Reynolds numbers $3000 < Re < 16000$ at air temperatures from 10 to 20 °C. The calorimetric method of melting ice was used. The heat transfer coefficient and the Nusselt number were calculated from the balance equations, and the Euler number was calculated from the value of the pressure drop. The Reynolds analogy factor was determined from the Nusselt and Euler numbers. An analysis of heat transfer and hydrodynamics during air flow around a bundle of cylinders with grooves was performed. Different types of spiral grooves on the surface of cylinders are considered. It is shown that the best heat transfer results were obtained for cylinders with steps of 10 mm and 40 mm. Cylinders with 20mm groove pitches were midway between 40mm grooved cylinders and smooth cylinders in terms of efficiency. This fact may be due to the peculiarities of the formation of vortices on the rear surface of the cylinder. The effect of groove geometry on hydraulic

resistance and heat transfer coefficient was investigated. It was established that the flat side walls of the grooves create greater resistance than the curved ones in the range of Reynolds number change from 3000 to 4500. It is shown that the dependence of the heat transfer coefficient on the air speed is non-monotonic in nature. At the same time, the use of grooved cylinders with straight side walls leads to an increase in heat transfer in the range of Reynolds numbers Re from 7000 to 16000.

Bibl. 8, Fig. 5.

Key words: heat transfer, hydraulic resistance, single-row bundle, circular cylinder, thermohydraulic performance.

1. Meyris A. Zh., Kovalenko G. V. [Comparison of various methods of intensification of heat exchange on cylindrical surfaces]. [Eastern European Journal of Advanced Technologies]. 3/12 (63), 2013, pp. 58-60. (in Rus.)

2. Kovalenko G. V. [Energy benefit of intensification of heat exchange in bundles of pipes with the help of cavities]. [International scientific and practical conference "Regional energy saving problems in energy production and consumption"]. October 25-29, 1999, Ukraine, Kyiv. P. 107-108. (in Rus.)

3. Khalatov A. A. Severyn S. D. Kovalenko G. V. Burlaka V. V. Meiris A. Zh. [Application of tubular heat exchange surfaces of the "recess-protrusion" type in heat exchangers of gas turbine installations]. [Industrial Heat Engineering]. Vol. 36, No. 5, 2014. P. 34-45. (in Rus.)

4. Zhukauskas A., Zhugzhda I. [Heat transfer of a cylinder in the transverse flow of a liquid]. Vilnius. "MOKSLAS" 1979. - 235 p. (in Rus.)

5. Mygai V.K., Firsova E. V. [Heat exchange and hydraulic resistance of pipe bundles]. Leningrad. Publishing house "NAUKA" 1986. 195 p. (in Rus.)

6. Khalatov A. A. Kovalenko G. V., Kobzar S. G., Kovalenko O. S., Mulyarchuk M. A. Patent of Ukraine A 202008153. [Device for removing combustion products of the primary heat generator]. (in Ukr.)

7. Khalatov A. A. Kovalenko G. V., Meyris A. Zh. [Heat transfer during transverse air flow around a pipe with artificial asymmetry]. [Industrial Heat Engineering]. Vol. 39, No. 4, 2017, pp. 27-32. (in Rus.)

8. Khalatov A. A. Kovalenko G. V. [Application of ice calorimeters for the study of heat transfer of surfaces formed by recesses]. [Industrial Heat Engineering]. Vol. 30, No. 2, 2008, pp. 5-12.

Отримано 23.05.2023

Received 23.05.2023

Прийнято до друку 15.08.2023
Accepted for publication 15.08.2023