

УДК 536.24:532.55

**ТЕРМОГАЗОДИНАМІКА ОДИНОЧНОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ  
ПОВЕРХНІ З ЗАГЛИБЛЕННЯМИ НА ЗОВНІШНІЙ СТОРОНІ**

*А. А. Халатов, академік, доктор технічних наук*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

*А. Ж. Мейріс, аспірант*

*А. В. Гамрецька, студентка*

*Національний Технічний Університет України*

*«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»*

*e-mail: [ameyris@gmail.com](mailto:ameyris@gmail.com)*

**Анотація.** *Представлені результати комп'ютерного моделювання теплообміну та гідравлічного опору при поперечному обтіканні циліндричної поверхні зі сферичними заглибленнями на зовнішній стороні. Отримані коефіцієнти тепловіддачі та гідравлічного опору. Розглянуті фізичні процеси інтенсифікації коефіцієнта тепловіддачі за рахунок нанесення заглиблень на циліндричну поверхню та структура течії в заглибленнях.*

**Ключові слова:** *теплообмін, гідравлічний опір, циліндрична поверхня з заглибленнями, сферичні заглиблення*

Зменшення маси та габаритів теплообмінних апаратів є актуальною проблемою теплоенергетики. Найбільш перспективний шлях вирішення цієї проблеми – інтенсифікація теплообміну.

Нині для зовнішньої інтенсифікації теплообміну широко використовуються різні методи профілювання труб і нанесення штучної шорсткості [5]. До таких методів інтенсифікації відносять метод використання пристінних інтенсифікаторів, а саме нанесення сферичних заглиблень на поверхню циліндрів, є одним із найефективніших. Використання такого методу зумовлює зміщення точки відриву в кормову область труби [4], що позитивно

впливає на теплообмін. Також такий спосіб інтенсифікації має суттєву перевагу та високу енергетичну ефективність за рахунок турбулізації лише пристінної області течії.

При турбулентному русі течії у заглибленні спостерігається утворення смерчеподібних вихрових структур, які зносяться течією з певною частотою. Система заглиблень призводить до нелінійної взаємодії окремих вихорів. Специфічна вихрова структура, тривимірна і нестационарна завихреність, мала висота вихорів над поверхнею з заглибленнями забезпечують високий рівень теплообміну і відносно низькі втрати тиску [7].

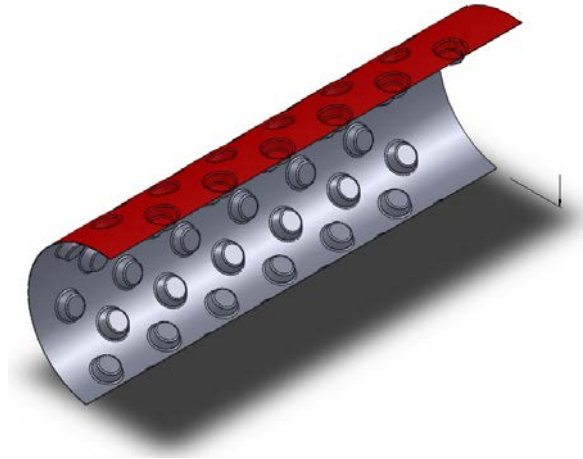
Згідно з роботами авторів [3] та [8], при поперечному обтіканні пучків труб, поверхня яких формована заглибленнями, тепловіддача збільшується, а гідравлічний опір зменшується в порівнянні з гладкими пучками труб. Проте досі не були досліджені причини такого ефекту та фізика інтенсифікації теплообміну.

**Мета досліджень** – встановлення фізики інтенсифікації теплообміну при поперечному обтіканні циліндричної поверхні зі сферичними заглибленнями на зовнішній стороні за допомогою числового моделювання.

**Матеріали та методика досліджень.** Числове моделювання процесів теплообміну циліндричних поверхонь із заглибленнями на зовнішній поверхні проводилися в комерційному пакеті ANSYS CFX.

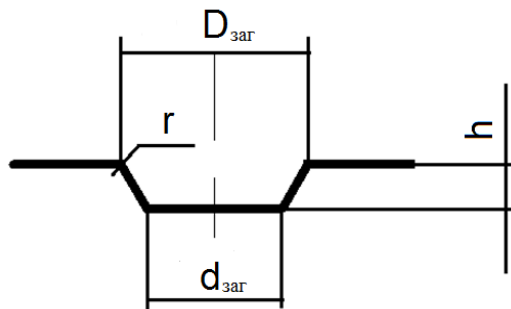
У ході числового моделювання геометричні параметри задавалися так: на циліндрі, діаметр якого становив 22 мм, розташовувалися заглиблення з відносною глибиною  $h/d_{\text{заг}}=0,3$ . Нижній діаметр заглиблення  $d_{\text{заг}}$  становив 3,0 мм, верхній діаметр  $D_{\text{заг}} - 4,0$  мм. Крок вздовж осі циліндра  $P_{\text{ак}}$  становив 4,9 мм, а крок по азимуту  $P_{\text{ан}} - 4,9$  мм. По азимуту було розташовано 15 заглиблень. Всього на поверхні циліндра розташовувались 318 заглиблень.

Внаслідок чого поверхня циліндра збільшилася в 1,41 рази (рис. 1).



**Рис.1. Геометрична форма досліджуваного циліндра з заглибленнями**

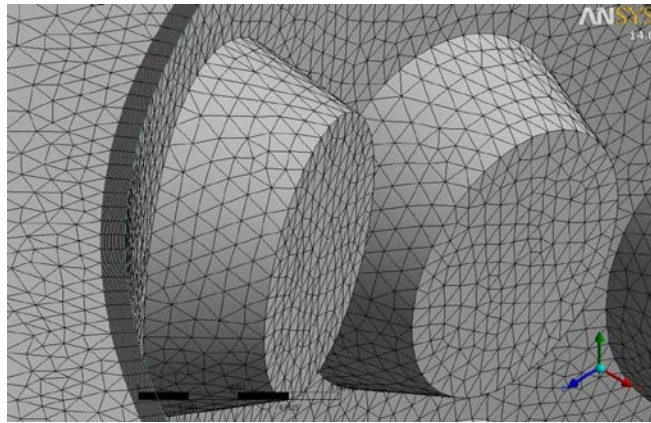
Перетин по центру заглиблення наведено на рис. 2. Глибина заглиблень становила  $h=1,3$  мм, радіус закруглення вхідної крайки –  $r=0,25$  мм.



**Рис. 2. Схема заглиблення**

Дискретизація розрахункової області проводилася у вбудованому редакторі сіток ANSYS Mesh. Вся розрахункова область розбивалась на тетраедри, а поблизу поверхні стінки створювалися трикутні призматичні шари, які дозволяють більш якісно описувати процеси, що відбуваються в примежовому шарі і в заглибленнях (рис. 3).

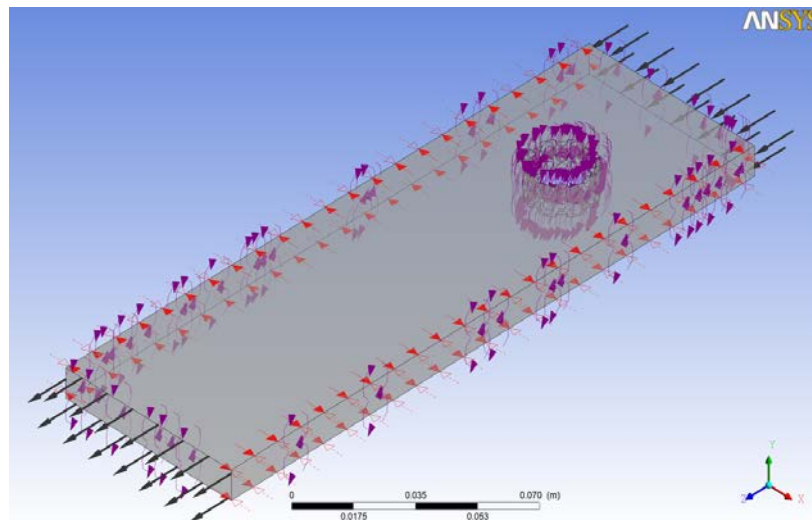
Основні параметри дискретизації розрахункової області число призматичних шарів – 20, висота першого шару 0,01 мм, фактор приросту 1,05. Максимальний розмір чарунки – 1,5 мм. Кількість елементів у моделі складала 23,2 млн.



**Рис. 3. Дискретизація розрахункової області**

Розрахунки проводилися для чисел Рейнольдса 8000, 10000, 15000.

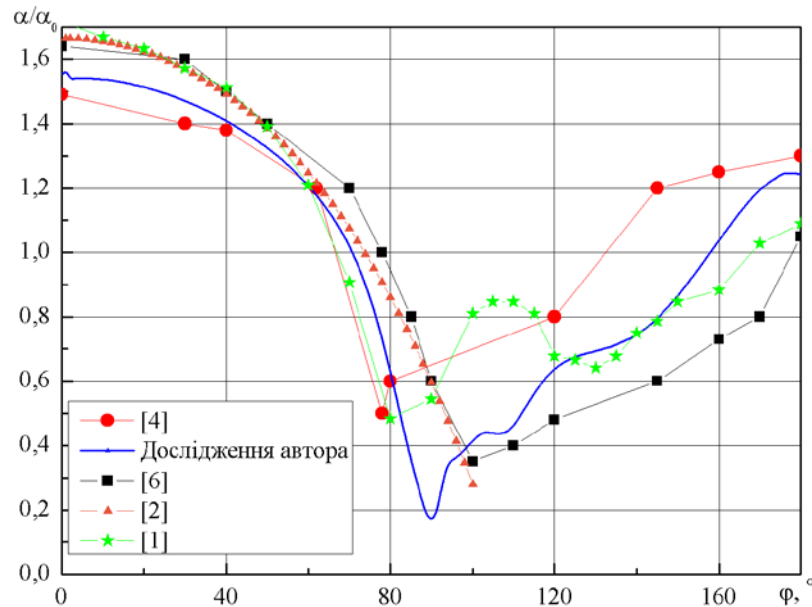
Граничні умови (рис. 4 ) задавалася так: постійна швидкість потоку з температурою 22 °С на вході і атмосферний тиск на виході, на досліджуваній поверхні задавалися граничні умови першого роду  $t=0^{\circ}\text{C}$ , на горизонтальних сторонах каналу задавалися симетричні граничні умови, а на інших – періодичні граничні умови.



**Рис.4. Граничні умови**

*Вибір адекватної моделі турбулентності.* Для математичного моделювання була обрана SST модель турбулентності як модель, яка найчастіше використовується для розрахунку теплообміну подібних об'єктів.

На рис. 5 показані результати розрахунку для гладкого циліндра за допомогою обраної моделі та літературні данні.

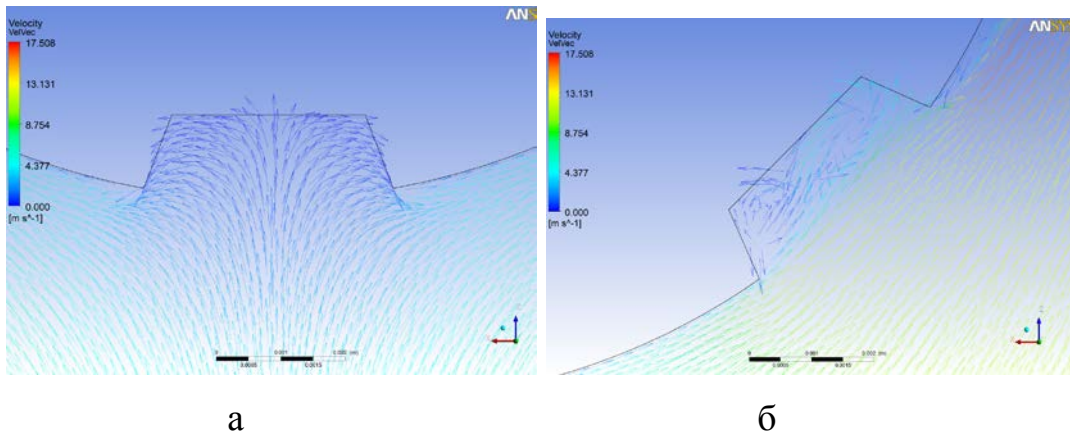


**Рис. 5. Розрахунок локального теплообміну одиночної циліндричної поверхні в порівнянні з літературними даними**

Як видно з рисунку, розрахунок з використанням моделі турбулентності SST відповідає характеру процесів теплообміну циліндричних поверхонь. У наслідок чого SST була обрана як модель турбулентності для дослідження термогазодинаміки циліндричної поверхні з заглибленнями, що показує найбільший збіг з літературними даними [5, 3].

**Результати досліджень.** *Фізична структура потоку.* У результаті чисельного моделювання процесів теплообміну при обтіканні циліндра з заглибленнями за допомогою програмного пакету ANSYS CFX з використанням моделі турбулентності SST ТТ отримана картина фізичної структури потоку. Як приклад, наведені результати для випадку, коли потік набігає на заглиблення.

На рис. 6, а показаний характер течії у першому (лобовому) заглибленні. Тут спостерігалась типова картина набігання потоку на перешкоду.



**Рис. 6. Векторне поле швидкостей в заглибленнях:**

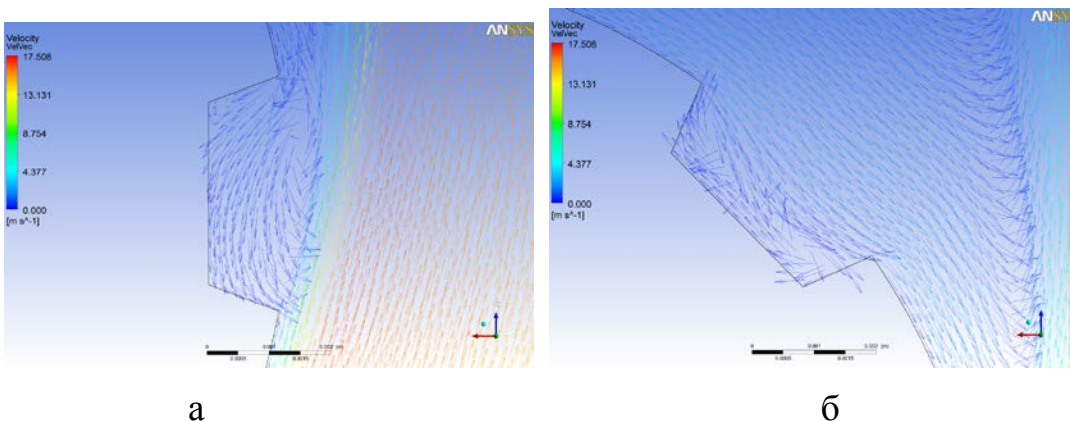
а – першому (лобовому); б – другому

На рис. 6, б показане векторне поле швидкостей у наступному заглибленні, де спостерігається утворення вихору у центральній та задній частинах заглиблення. Тоді як у передній частині спостерігається застійна зона, яка не бере участі в теплообміні. Цей недолік компенсується зривом вихору та його викидом за задньою частиною заглиблення.

На рис. 7, а представлений характер течії у третьому заглибленні. Тут починається зона зворотної течії біля передньої частини заглиблення, де розташована точка відриву.

На рис. 7, б показане поле швидкостей у четвертому заглибленні. Це заглиблення повністю розташоване у зоні зворотних течій.

П'яте заглиблення також знаходиться у зоні зворотних течій та не впливає на теплообмін.



**Рис. 7. Векторне поле швидкостей в заглибленнях:**

а – третьому; б – четвертому

Визначено, що кут відриву для досліджуваної поверхні становить  $85^\circ$ . Тоді як для гладкого циліндра –  $82^\circ$ . Тобто нанесення заглиблень майже не впливає на зону відриву в досліджуваному діапазоні швидкостей для одиночного циліндра.

З аналізу отриманих рисунків векторних полів швидкостей можна припустити, що причиною інтенсифікації є турбулізація заглибленнями примежового шару. Відбувається локальне руйнування (розділення) примежового шару в заглибленнях, внаслідок чого зменшується термічний опір. Також позитивно впливає на теплообмін локальне вихроутворення.

*Результати дослідження теплообміну.* За допомогою числового моделювання був встановлений характер розподілу інтенсивності тепловіддачі по колу. З метою встановлення впливу нанесення заглиблень на поверхню циліндра на інтенсивність тепловіддачі, розраховувалось відношення коефіцієнта тепловіддачі досліджуваної поверхні до коефіцієнта тепловіддачі аналогічного гладкого циліндра.

На рис. 8 показані розподіли відношень коефіцієнта тепловіддачі досліджуваної поверхні до коефіцієнта тепловіддачі гладкої поверхні по колу циліндра при швидкості набігаючого потоку 9 м/с. Оскільки заглиблення розташовані у шаховому порядку, то чорним кольором на рисунку показаний випадок, коли потік набігає прямо на заглиблення, червоним – коли потік набігає на ділянку циліндра між двома заглибленнями. Синім кольором позначена інтенсивність тепловіддачі у заглибленнях. Як видно з рисунка, у заглибленні інтенсивність тепловіддачі суттєво менша ніж після заглиблення. Максимальний коефіцієнт тепловіддачі спостерігається на вихідній кромці заглиблення. Це зумовлено тим, що в цій області зовнішній потік набігає на заглиблення, внаслідок чого в заглибленні утворюється вихор. Тобто основними причинами інтенсифікації тепловіддачі є турбулізація потоку за заглибленням та на вихідній кромці заглиблення.



У таблиці показані середні коефіцієнти тепловіддачі у заглибленнях –  $\alpha_{in}$ , зоні за заглибленнями –  $\alpha_{ex}$ , на всьому циліндрі –  $\alpha_{ov}$ , відносний вклад тепловіддачі у заглибленнях до тепловіддачі за заглибленнями –  $\alpha_{in}/\alpha_{ov}$  та відносний вклад тепловіддачі у заглибленнях до тепловіддачі на всьому циліндрі –  $\alpha_{in}/\alpha_{ex}$  при різних швидкостях потоку.

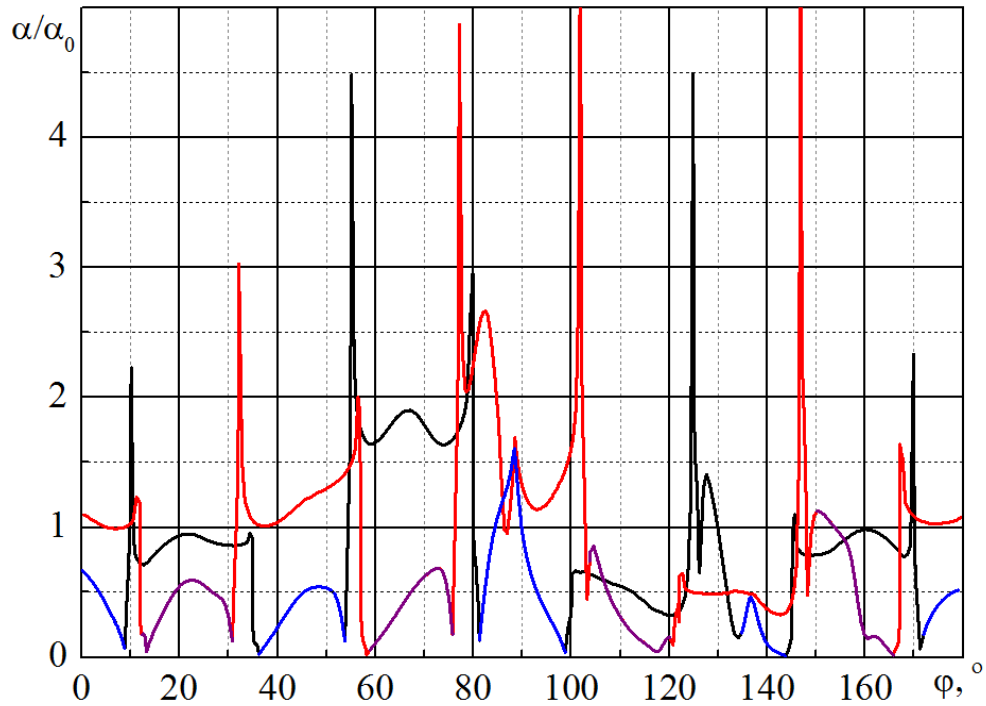


Рис. 8. Розподіл інтенсивності тепловіддачі

**Середні коефіцієнти тепловіддачі в заглибленнях, за заглибленнями та на усій поверхні**

$v, \text{ м/с}$	$\alpha_{in}, \text{ Вт/м}^2$	$\alpha_{ex}, \text{ Вт/м}^2$	$\alpha_{ov}, \text{ Вт/м}^2$	$\alpha_{in}/\alpha_{ov}, \%$	$\alpha_{in}/\alpha_{ex}, \%$
5	30,820	77,069	63,575	48,5	40
6,5	38,648	89,543	76,708	50,4	43
9	52,504	109,851	98,912	53	48

Звідки видно, що зі збільшенням швидкості потоку вклад тепловіддачі у заглибленнях збільшується. Проте це не зменшує ріст тепловіддачі зі



збільшенням швидкості потоку, оскільки тепловіддача в заглибленнях також збільшується.

Також порівняння отриманих розподілів коефіцієнтів тепловіддачі для гладкого циліндра та для циліндра з заглибленнями дозволяє зробити висновок, що коефіцієнт тепловіддачі досліджуваної поверхні більший, ніж коефіцієнт тепловіддачі аналогічної гладкої поверхні. Отримане числове значення середнього коефіцієнту тепловіддачі при швидкості потоку 9 м/с для гладкого циліндра становить  $93 \text{ Вт/м}^2$ , тоді як для досліджуваного циліндра з заглибленнями воно становить  $99 \text{ Вт/м}^2$ . Звідки середнє число Нуссельта для досліджуваної поверхні становить 84,5, а для аналогічної гладкої поверхні – 78,7. Тобто нанесення заглиблень на поверхню збільшило інтенсивність тепловіддачі на 7,4 %.

Також було визначено, як змінюватиметься гідравлічний опір при нанесенні описаних заглиблень на поверхню циліндра. Значення числа Ейлера для гладкого циліндра становило 0,27. У випадку циліндра з заглибленнями число Ейлера становило 0,3. Таким чином, середній гідравлічний опір зріс на 11 % при нанесенні заглиблень на поверхню циліндра. Отже, внаслідок числового моделювання процесів тепловіддачі циліндричних поверхонь з заглибленнями на зовнішній поверхні, встановлено, що нанесення заглиблень спричинило збільшення середньої тепловіддачі на 7,4% та гідравлічного опору на 11%. Таким чином, фактор аналогії Рейнольдса складає 0,97.

### **Висновки**

Проведено математичне моделювання термогазодинаміки циліндричної поверхні з заглибленнями на зовнішній стороні. Визначено, що причиною інтенсифікації є турбулізація примежового шару за заглибленнями та на вихідній кромці заглиблення. Також позитивно впливає на теплообмін локальне вихроутворення.

Досліджено, що нанесення заглиблень на циліндричну поверхню майже не впливає на зону відриву в досліджуваному діапазоні швидкостей для одиночного циліндра.

Нанесення заглиблень на поверхню збільшило інтенсивність тепловіддачі на 7,4 %, а гідравлічного опору на 11 %. Фактор аналогії Рейнольдса складає 0,97.

### **Список літератури**

1. Ertan Buyrukю Heat Transfer and Flow Structures Around Circular Cylinders in Cross-Flow // Tr. J. of Engineering and Environmental Science – Department of Mechanical Engineering, Sivas-Turkey. – 23 (1999), 299. – 315 p.

2. Frossling N. (1940): Verdunstung, Wärmeübertragung und Geschwindigkeitsverteilung bei zweidimensionaler und rotationssymmetrischer laminarer Grenzschichtströmung. Lunds. Univ. Arsskr.N.F. Avd. 2, 35, Nr.4.

3. Беленький М. Я. Экспериментальное исследование тепловых и гидравлических характеристик теплообменных поверхностей, формованных сферическими лунками / М. Я. Беленький, М. А. Готовский, Б. М. Леках, Б. С. Фокин, В. Б. Хабенский // Теплофизика высоких температур. – 1991. – Т. 29. – № 6. – С. 142-147.

4. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.

5. Калинин, Э. К. Интенсификация теплообмена в каналах / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, С. А. Ярхо. – М. : Машиностроение, 1972. – 220 с.

6. Кутателадзе С. С Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справ. пособие. / С. С. Кутателадзе. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

7. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений / А.А. Халатов – К.: Изд. ИТТФ НАНУ, 2005. – 76 с.

8. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамическое сопротивление при поперечном обтекании воздухом первого ряда пучка труб со сферическими углублениями / А. А. Халатов, А. Ж. Мейрис, Т. В. Доник, А. В. Гамрецкая // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 16(1125). – С. 50–53.

## **ТЕРМОГАЗОДИНАМИКА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ С УГЛУБЛЕНИЯМИ НА ВНЕШНЕЙ СТОРОНЕ**

*А. А. Халатов, А. Ж. Мейрис, А. В. Гамрецкая*

**Аннотация.** *Представлены результаты компьютерного моделирования теплообмена и гидравлического сопротивления при поперечном обтекании цилиндрической поверхности со сферическими углублениями на внешней стороне. Получены коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления. Рассмотрены физические процессы интенсификации коэффициента теплоотдачи за счет нанесения углублений на цилиндрическую поверхность и структура течения в углублениях.*

**Ключевые слова:** *теплообмен, гидравлическое сопротивление, цилиндрическая поверхность с углублениями, сферические углубления*

## **THERMOGASDYNAMICS CYLINDRICAL SURFACE WITH A RECESS ON THE OUTER SIDE**

*A. Khalatov, A. Meyris, A. Gamretskaya*

**Annotation.** *The results of computer simulation of heat transfer and hydraulic resistance in crossflow cylinder surface with spherical dimples on the outside are submitted. Heat transfer coefficient and hydraulic resistance coefficient was obtained. Physics of intensification of heat transfer coefficient through the use of dimples on the cylindrical surface and the flow pattern in the dimple was discussed.*

**Keywords:** *heat exchange, hydraulic resistance, cylindrical surface with dimples, the spherical dimples*