

УДК 536.24541.11

## КОЛИВАННЯ ПРИ ОБТІКАННІ ПОТОКОМ ПОВІТРЯ ЗАГЛИБИН НА ГЛАДКІЙ ПОВЕРХНІ

Халатов А.А.<sup>1</sup>, академік НАН України, Коваленко Г.В.<sup>2</sup>, канд. техн. наук*Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна.*<sup>1</sup>завідувач відділу ВТТГД, професор, artem.khalatov1942@gmail.com<sup>2</sup>старший науковий співробітник, gkliashkova5@gmail.com<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2024.1>

*Визначені залежності коефіцієнтів гідравлічного опору від чисел Рейнольдса при обтіканні повітрям напівсферичних і циліндричних заглибин декількох розмірів.*

*Hydraulic resistance coefficients dependences from Reynolds numbers were experimental determined under flowing of cylindrical and semispherical dimples of different depth.*

### **Вступ**

Хвильові збурення перспективні для зменшення гідроакустичного шуму, зниження гідравлічного опору, інтенсифікації тепло- і масообміну. Одним зі способів утворення коливань потрібної частоти і амплітуди є обтікання поверхонь з заглибинами. Такі поверхні зустрічаються в літальних апаратах, підводних та надводних суднах, теплообмінниках.

### **Мета роботи**

Метою роботи є оцінка різних способів інтенсифікації теплообміну при обтіканні повітрям напівсферичних і циліндричних заглибин різного розміру.

В даній роботі досліджувались обтікання напівсферичних і циліндричних заглибин різної глибини, якщо в них спостерігались режими підковоподібного (HS) і стовпоподібного (R) вихорів [1,2].

### **Аналіз стану досліджень**

Течіям біля поверхонь з заглибинами присвячено багато робіт, в яких розглянуто велике розмаїття форм тіл, що обтікаються, умов виникнення різних типів вихорів, їх взаємодії зі стінкою і між собою [1-5].

В той же час актуальним залишається створення бази даних відносно характеристик полів швидкостей і тиску, як в заглибинах, так і в їх довкіллі.

В самій циліндричній заглибині, як і в заглибині, що має форму сферичного сегменту, спостерігаються наступні картини течії [1]. При малих швидкостях течія має безвідливний дифузотно-конфузотний характер (N). Лінії течії біля заглибини викривлюються в сторону заглибини.

При збільшенні швидкості біля вхідної крайки потік відривається, а в заглибині утворюється підковоподібний вихор, кінці якого опираються на бічні стінки заглибини з двох сторін площини симетрії заглибини. Примежовий шар над заглибиною періодично згортається, відривається і перетворюється в стежку Кармана. При збільшенні швидкості частота відривання вихорів зростає.

І, нарешті, при ще більшій швидкості один з кінців підковоподібного вихору піднімається над заглибиною, перетворюючись в стовпоподібний (R). Верхня його частина зноситься потоком по течії. Положення вихору нестійке і його нижній кінець може перескакувати з лівої частини заглибини в праву і навпаки. Крім порівняно повільних переміщень з одної половини заглибини в іншу, вихор коливається з високою частотою поперек своєї поздовжньої осі. Шар над заглибиною з частиною стовпоподібного вихору відривається і утворює вихрову стежку.

Різка зміна геометрії поверхні при достатньо значній швидкості потоку на передньому краю заглибини є причиною утворення зсувного шару. Швидкість в цьому шарі зі сторони заглибини менша ніж зі сторони основного потоку. Тому на деякій відстані від місця відриву в зсувному шарі починають утворюватися вихорові структури, які повторюються і виходять в основний потік. Внаслідок різниці швидкостей на обох сторонах зсувного шару він відхиляється в сторону заглибини і частина його натикається на її задню (кормову) стінку. Місце удару є джерелом звукових коливань. Якщо частота якої небусть гармоніки цих коливань співпадає з

частотою сходження вихрових структур зсувного шару, ці два явища починають підсилювати один одного [3] [4]. Осциляції потоку всередині і поблизу заглибини поділяють на наступні класи [5].

1.) Гідродинамічні коливання, які виникають в результаті нестійкості зсувного шару. Вони можуть підсилюватись взаємодією з вихровими системами, які формуються всередині заглибин і утворюють викиди в примежовий шар.

2.) Осциляції, викликані взаємодією стоячих хвиль тиску в заглибині і акустичних хвиль, випромінюваних з місць різкої зміни профілю поверхні.

3.) Осциляції, пов'язані з гідропружністю, коли коливання твердих границь індуковані вихорами, які взаємодіють між собою, і акустичних хвиль із твердою поверхнею [4].

Звуковий тиск, який випромінюється заглибинами, зменшується з ростом товщини примежового шару [7].

Існує розв'язок для простого гармонічного осцилятора Гельмгольца [3], яким можуть бути як циліндричні заглибини, так і заглибини в формі сегменту сфери. Власна частота таких резонаторів  $\omega$  залежить від швидкості звуку  $c$  в середовищі, що заповнює резонатор, його об'єма  $V$ , площі горла резонатора  $s$  і його ефективної довжини  $L$ .

$$\omega = c(s/L \cdot V)^{0,5} \quad (1)$$

де ефективна довжина горла резонатора

$$L = l + d\pi/4 \quad (2)$$

де  $l$  - довжина горла резонатора,  $d$  - діаметр горла резонатора.

В припущенні, що напівсферична або циліндрична заглибина, глибина якої дорівнює радіусу циліндра, являють собою резонатори Гельмгольца з широким горлом і відповідним об'ємом, частоти коливань  $f$  при сталій температурі повітря будуть залежати тільки від діаметрів заглибин  $d$ .

Для напівсферичних заглибин

$$f_s = 106,43/d \quad (3)$$

Для циліндричних заглибин з відношенням глибини до діаметру  $h/d = 0,5$

$$f_c = 86,9/d \quad (4)$$

В проведених дослідях вживались заглибини діаметром 3мм. Відповідно, частоти при максимальних швидкостях повітря за напівсферичними заглибинами переважно були  $f_s = 35,4$  Гц, а за циліндричними  $f_c = 29$  Гц. Різницю в частотах можна пояснити тим, що при однаковому діаметрі горла циліндричні заглибини мають трохи більший об'єм, ніж напівсферичні. Коефіцієнт теплообміну за циліндричними заглибинами при однакових інших умовах перевищує коефіцієнт теплообміну за напівсферичними заглибинами.

Залежності чисел Струхалія від числа Рейнольдса для таких резонаторів будуть обернено пропорційні швидкості потоку. В заглибинах, перспективних для інтенсифікації теплообміну, управління відривом потоку, покращення змішування і інших застосувань відношення глибини заглибини до її діаметру не повинні перевищувати 0,5.

Для більшості практичних задач актуальними є низькочастотні коливання, пов'язані з виникненням в заглибинах вихрових структур. При достатньо великій швидкості ( $Re_n > 120$ ) потік, що обтікає заглибину, не приєднується до дна заглибини [8]. Після удару об задню стінку заглибини частина потоку повертає в заглибину, утворюючи порівняно стійку вихрову структуру.

Швидкість на зовнішній границі примежового шару цієї структури  $U_c$  постійна і дорівнює  $U_c = 0,4U$ , де  $U$  - швидкість в ядрі потоку [9]. Період викидів речовини з заглибини можна оцінити, розраховуючи час, потрібний для проходження порціями газу всіх частин траєкторії руху, враховуючи, що над заглибиною швидкість потоку -  $U$ , а у внутрішній частині -  $U_c$ . Якщо допустити, що вихрова структура займає всю заглибину, число Струхалія ( $Sh = f d/U$ ) для напівсферичної заглибини буде дорівнювати  $Sh = 0,203$ , а для циліндричної з відношенням глибини до діаметру  $h/d = 0,5$  -  $Sh = 0,166$ .

Іншу оцінку частоти пульсацій в циліндричній заглибині роблять по формулі Россітера (5).

$$f = mU/[d(M + U/c_1)], \quad (5)$$

де  $m$  - номер моди коливань,  $M$  - число Маха,  $c_1$  - швидкість хвилі, яка розповсюджується вперед.

Залежність числа Струхалія від числа Рейнольдса немонотонна. В районі існування в заглибині підковоподібного вихору числа Струхалія при збільшенні чисел Рейнольдса ростуть, а в зоні існування стовпоподібного вихору - зменшуються. Всі перші моди коливань не задовольняють критерію стійкості (6) зсувного шару [12].

Подібна немонотонна залежність числа Струхалія від числа Рейнольдса одержана і для дрібних загли-

бин в вигляді сферичних сегментів. Положення максимуму зміщене в сторону більших чисел Рейнольдса, а самі числа Струхаля перевершують відповідні для напівсферичних заглибин в 1,1 – 3 рази.

Значення чисел Струхаля в експериментах біля напівсферичних заглибин у різних авторів сильно відрізняються. Це можна пояснити тим, що в багатьох експериментах фіксувались лише частоти з максимальною енергією коливань.

Крім того, помітний вплив на інтенсифікацію теплообміну виявляє гострота крайок заглибин.

Найбільш низькочастотними виявляються коливання, викликані викидами речовини з заглибин. Подібні частоти спостерігаються в стежці вихорів, що нагадують стежку Кармана. Коливання зсувного шару над заглибиною корелюють з результатами Кікнадзе та ін. [13]. Коливання, пов'язані з обертанням вихору в заглибині трохи відрізняються від результатів Воскобійника [10]. Високі частоти пояснюються як результат удару в кормову стінку заглибини.

#### Методи досліджень

Досліди виконувались на аеродинамічному стенді ІТТФ НАН України. Потужний вентилятор засмоктавав повітря з експериментальної кімнати, де підтримувалась майже постійна температура. Перед тим, як потрапити в дослідну ділянку потік проходив сенсори приладів витрати, втрати тиску і хонейкомб, де вимірювалась його витрата, перепад тиску, а профіль його швидкості коректувався.

Похибки вимірювань характерних параметрів дослідів не перевершували 12%.

## 2. Результати досліджень

Числа Струхаля відповідають гармонікам з найбільшими амплітудами коливань для заглибин з розмірами  $C = 0,5; 0,3418; 0,2215$ . (Коливання відповідні характерним частотам самого каналу не враховувались.)

Для розширення діапазону порівнянь комп'ютерних розрахунків з експериментом були проведені досліди з маленьким отвором в дні циліндричної заглибини. Застосування на дні заглибини осьової порожнини призвело до появи суттєвої різниці частот коливань носової і кормової частин заглибини.

При числах Рейнольдса більших 14000 різниця між частотами коливань носової, кормової і бокової поверхонь заглибини знаходиться в межах похибки досліду, а їх значення відповідає частоті обертання вихору в заглибині. Найменші значення коефіцієнтів опору знаходяться в проміжку відношень глибини заглибини до її діаметру  $0,75 > h/d > 0,34$  (рис.1).

Застосування осьового (конічного) заглиблення в центрі плоского дна заглибини зменшило амплітуди коливань на його бокових стінках в 5,5 - 7,5 рази, в носовій частині заглибини – в 4 – 6 раз, а в кормовій – в 2 рази.

Значення коефіцієнтів опору дільниці каналу з циліндричною заглибиною різної глибини при великих числах Рейнольдса ( $Re_d > 25000$ ) розподіляються у відповідності з результатами Вігхарта [8]. Найменші значення відповідають заглибині з відношенням глибини до діаметру  $C = 0,3418$ . Великого зменшення гідравлічного опору для «надглибоких» заглибин ( $h/d = 0,7532$ ) не спостерігалось.

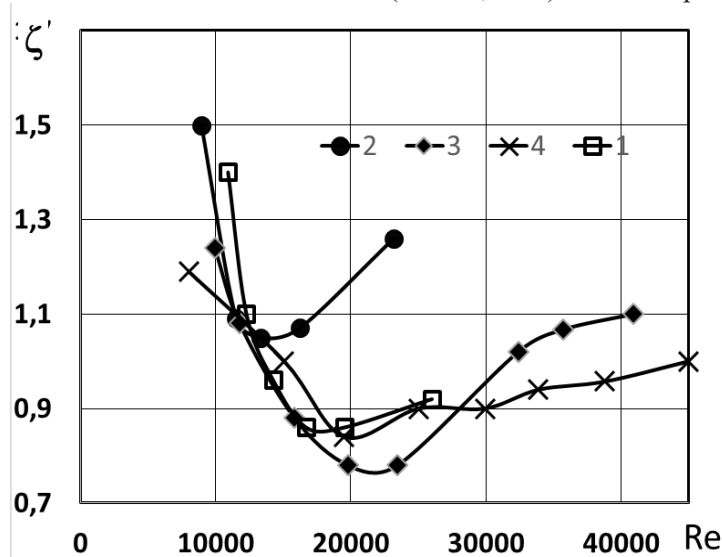


Рис. 1. Залежність коефіцієнту опору робочої ділянки з циліндричною заглибиною в від числа Рейнольдса при декількох значеннях відношення глибини заглибини  $h$  до її діаметру  $d$ .

1 –  $h/d = 0,5$ ; 2 –  $h/d = 0,7532$ ; 3 –  $h/d = 0,3418$ ; 4 –  $h/d = 0,2215$

На рис. 2 показано фото вхідної частини тонкої трубки, на зовнішній поверхні якої утворено систему циліндричних заглибин діаметром 3 мм, а знизу трубка обігривається полум'ям метану, що горить.

Видно більш нагріті границі вхідних отворів заглибин **1** (червоний колір). Зону повного горіння **2** (блакитна); два язика полум'я з недоліком кисню (жовті - **3**).

Між границями заглибин, нагрітих до температури 800 °С, (1- червоний колір) видно темні донні поверхні заглибин, що свідчить про те, що потоки гарячого газу не доходять до дна заглибини.

Подібні результати для інших розмірів заглибин було одержано і в роботах [14, 15].

### Висновки

Експериментально одержано докази виникнення при обтіканні циліндричних заглибин коливальних з частотами, принаймні в трьох діапазонах.

Діапазони можна поставити у відповідність з явищами, що виникають при ударі потоку об кормову частину заглибини, обертанні вихора в заглибині і викидає речовини з заглибини.

Найменший коефіцієнт опору одержано в заглибинах з відношенням глибини заглибини до її діаметру  $h/d = 0,3418$ .

Прогнози відносно малого гідравлічного опору заглибин з відносною глибиною, більшою ніж 0,5 не підтвердились.

Приєднання до донної частини заглибини додаткових пружних об'ємів, навіть невеликих розмірів, може

привести до істотного демпфування коливань і зменшення гідравлічного опору.

Однією з причин різної інтенсифікації теплообміну з допомогою заглибин може бути взаємодія звукових і псевдо звукових коливань зі зсувним шаром над заглибиною.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Коваленко Г. В., Халатов А. А. Границы режимов течения в углублениях на плоской поверхности, имеющих форму сферических сегментов// Прикладная гидромеханика 2008 №1.- С. 23-32.

2. Турик В. Н., Бабенко В. В., Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Вихревое движение в полусферической лунке на поверхности обтекаемой пластины// Вісник НТТУ «КПІ». Машинобудування.- 2006.-48.- С.79 -85.

3. Блохинцев Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды.- М.: «Наука», 1981.

4. Воропаев Г.А., Воскобойник В.А., Воскобойник А.В., Гринченко В.Т., Исаев С.А., Розумнюк Н.В. Источники псевдозвуковых пульсаций давления при обтекании сферической лунки// Акустический вестник.- 2008. Т.11, № 3.- С. 27 – 49.

5. Rockwell D., Naudascher E. Review – Self-sustaining oscillations flow past cavities// J. Fluids Eng.- 1978.-100, №2.-P.152-165.

6. Foley A. W., Hove M. S., Brungart T. A. Sound generated by a jet-exited spherical cavity// Journal of Sound and Vibration. August 2008/ V. 315, Issues 1-2. Pp. 89 – 99.

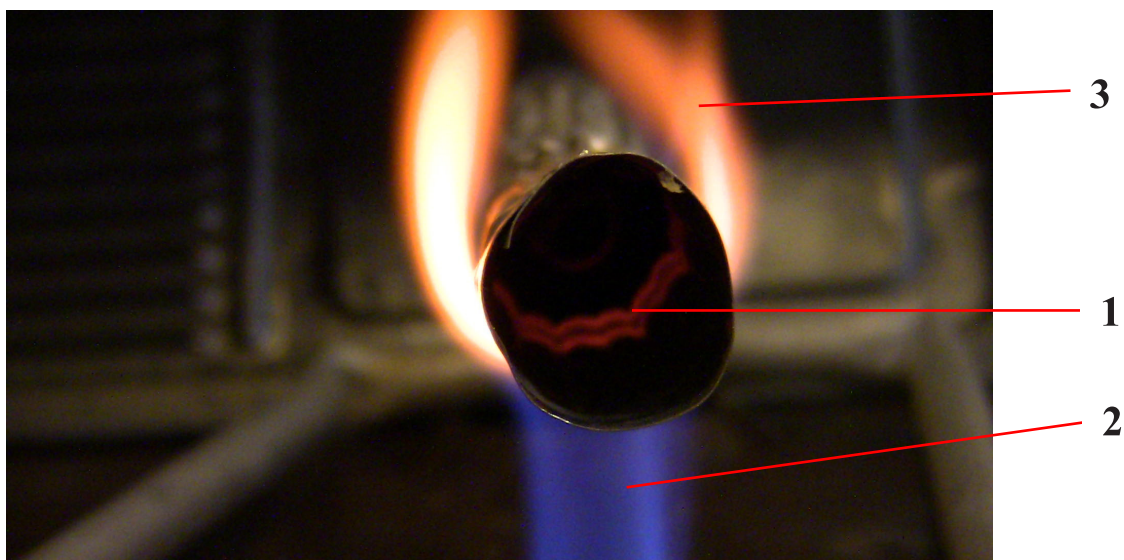


Рис.2. Горіння метану під трубкою зі сталі 1Х18Н10Т (товщиною 0,2 мм) з системою циліндричних заглибин діаметром 3 мм:

1 – границі вхідних отворів заглибин; 2 – зона повного горіння газу; 3 – горіння з недоліком кисню.

7. *Ahuja K. , Mendoza J.* Effects of cavity dimensions, boundary layer and temperature on cavity noise with emphasis on benchmark data to validate computational aeroacoustic codes//NASA CR.-1995.-N 4653-P. 1-284.
8. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: «Наука», 1969. -742 с.
9. *Hankey W.L., Shang J.S.* Analyses of Pressure Oscillations in an open Cavity// AIAA Journal.- 1980. V. 18, № 8, - Pp. 892 – 898.
10. *Воскобійник А.В.* Формування когерентних вихрових структур у закручених потоках і заглибинах. - Автореферат дис. на зд. наук. ст. к. т. н. – Ін-т гідромеханіки НАН України, Київ., 2005.-18.
11. *Michalke A.* On the Inviscid Instability of the Hyperbolic-Tangent Velocity Profile// Journal of Fluid Mechanics. - Aug. 1964.V. 19, - Pp. 543 – 556.
12. *Халатов А.А.* Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок).- Киев: НАН Украины, Институт технической теплофизики, 2005.-76 с.
13. *Kiknadze G., Gachechiladze I., Oleinikov V.* Tornado-like technology of heat and mass transfer intensification at lagging increase of hydraulic losses (Review of experimental results and intensification mechanisms). Moscow: Basert Co.Ltd. 1994 -1995. 102 p.
14. *Khalatov A., Kovalenko G.* Fluid flow and heat transfer at a cross flow of dimples tubes in confined spaces// Preprint ASME No GT 2003-38155. Int. Gas Turbine Inst. – USA – 2003
15. *Khalatov A., Kovalenko G.* Characteristic features of hydrodynamics and heat transfer in transverse flow past cylinders with dimples in single-row bundles // “Heat transfer Research“.-vol. 35- N 7-8.USA.-2004

## OSCILLATIONS DURING AIR FLOW NEAR DENTS ON A FLAT SURFACE

**Khalatov A.A.<sup>1</sup>, Kovalenko G.V.<sup>2</sup>**

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

<sup>1</sup>*Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department, artem.khalatov1942@gmail.com*

<sup>2</sup>*PhD (Engin.), Senior Researcher*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2024.1>

The purpose of the work is to evaluate the intensification of heat transfer using various types of recesses when air flows around heat transfer surfaces with possible minimization of pressure losses.

The creation of compact devices for space and the armed forces requires solving similar problems. One of the proposed methods is the use of recesses on streamlined heat transfer surfaces.

This paper presents the results of experimental studies of flow around surfaces with depressions. Two types of recesses were considered: cylindrical and hemispherical segments. The influence of flow velocity on the formation of vortex structures when flowing around surfaces with depressions was studied. It was shown that at low speeds the flow has a diffuser and confuser character. As the speed increases at the inlet edge of the notch, the flow was interrupted and a horseshoe-shaped vortex was formed in the notch. In this case, the boundary layer above the depression periodically collapses, and its lower end jumps from one half of the depression to the other, breaks off and turns into a Karman trace. With a further increase in speed, one of the ends of the horseshoe-shaped vortex rises above the depression, turning into a columnar one.

The nature of the flow over the depression was analyzed. It was noted that part of the shear layer is deflected towards the excavation and hits its rear (aft) wall. The location of the impact is the source of sound vibrations. It was shown, that when the frequency of any harmonic of these oscillations coincides with the frequency of shear layers vortex structures, these two phenomena begin to reinforce each other. Flow fluctuations near and inside the excavation could be divided into classes.

1. Hydrodynamic vibrations arising due to the instability of the shear layer.

2. Oscillations resulting from the interaction of standing pressure waves in the depression and acoustic waves emitted from places where the surface profile changes sharply.

3. Oscillations, when a sharp change in the shape of the surface causes the formation of vortices.

It was shown, that the sound pressure caused by the presence of depressions decreases with increasing boundary layer thickness.

References 15, figures 2.

**Key words:** cylindrical dimples, semispherical dimples, pressure pulsations, Reynolds number, hydraulic resistance, frequency, Strouhal number, Mach number.

1. Kovalenko G. V., Khalatov A. A. [Boundaries of flow regimes in depressions on a flat surface having the shape of spherical segments] // Applied hydromechanics 2008 No. 1, P. 23-32 [in Rus].

2. Turik V.N., Babenko V.V., Voskoboynik V.A., Voskoboynik A.V. Vortex motion in a hemispherical dimple on the surface of a streamlined plate // Newsletter of NTU "KPI". Machine building. 2006. 48. P.79,-85. [in Rus].

3. Blokhintsev D.I. [Acoustics of an inhomogeneous moving medium]. M.: "Nauka", 1981. [in Rus].

4. Voropaev G. A., Voskoboynik V. A., Voskoboynik A. V., Grinchenko V. T., Isaev S. A., Rozumnyuk N. V. Sources of pseudo sonic pressure pulsations in flow around a spherical hole // Acoustic Bulletin. 2008. V.11, No. 3. P. 27 – 49.

5. Rockwell D., Naudascher E. Review – Self-sustaining oscillations flow past cavities// J. Fluids Eng- 1978.-100, No. 2.-P.152-165.

6. Foley A.W., Hove M.S., Brungart T.A. Sound generated by a jet-exited spherical cavity // Journal of Sound and Vibration. August 2008/ V. 315, Issues 1-2. pp. 89 – 99.

7. Ahuja K., Mendoza J. Effects of cavity dimensions, boundary layer and temperature on cavity noise with emphasis on benchmark data to validate computational aeroacoustic codes//NASA CR.-1995.-N 4653-P. 1-284.

8. Schlichting G. [Theory of the boundary layer]. M.: "Science", 1969. 742 p. [in Rus].

9. Hankey W. L., Shang J.S. Analyses of Pressure Oscillations in an open Cavity// AIAA Journal - 1980. V. 18, № 8, P. 892 – 898.

10. Hankey W.L., Shang J.S. Analyses of Pressure Oscillations in an open Cavity. AIAA Journal. 1980. V. 18, № 8, P. 892 – 898. [in Ukr].

11. Michalke A. On the Inviscid Instability of the Hyperbolic-Tangent Velocity Profile// Journal of Fluid Mechanics. Aug. 1964.V. 19, P. 543 – 556.

12. *Michalke A.* On the Inviscid Instability of the Hyperbolic-Tangent Velocity Profile. *Journal of Fluid Mechanics*. Aug. 1964.V. 19. P. 543 – 556. [in Rus] .

13. *Kiknadze G., Gachechiladze I., Oleinikov V.* [Tornado-like technology of heat and mass transfer intensification at lagging increase of hydraulic losses] (Review of experimental results and intensification mechanisms). Moscow: Basert Co.Ltd. 1994 -1995. 102 p. [in Rus].

14. *Khalatov A., Kovalenko G.* Fluid flow and heat transfer at a cross flow of dimples tubes in confined spaces// Preprint ASME No GT 2003-38155. *Int. Gas Turbine Inst.* USA – 2003.

15. *Khalatov A., Kovalenko G.* Characteristic features of hydrodynamics and heat transfer in transverse flow past cylinders with dimples in single-row bundles // “Heat transfer research“, V. 35, N 7-8. USA, 2004.

*Отримано 09.04.2024*

*Received 09.04.2024*

*Прийнято до друку 17.08.2024*

*Accepted for publication 17.08.2024*