

УДК 532.525.6

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗСУВНОГО І БЕЗЗСУВНОГО ПОТОКУ З ПЕРІОДИЧНОЮ ШВИДКІСНОЮ НЕСТАЦІОНАРНІСТЮ

Супрун Т.Т., канд. техн. наук

*Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна*

Представлені результати експериментального моделювання зсувного і беззсувного потоку з періодичною швидкісною нестационарністю, організованою за допомогою генератора періодичних слідів типу «біляче» колесо. Метою роботи є порівняння структури потоку за «білячими» колесами, а також аналіз особливостей перехідного примежового шару для двох різних способів розташування робочих поверхонь: в зоні центрального беззсувного ядра або периферійної зсувної зони.

Представлены результаты экспериментального моделирования сдвигового и бессдвигового потока с периодической скоростной нестационарностью, организованной с помощью генератора периодических следов типа «беличье» колесо. Целью работы является сравнение структуры потока за «беличьими» колесами, а также анализ особенностей переходного пограничного слоя для двух различных способов расположения рабочих поверхностей: в зоне центрального бессдвигового ядра или периферийной сдвиговой зоны.

The results of experimental modeling of shear and shearless flow with periodic velocity nonstationarity, organized using a generator of periodic wakes such as the "squirrel" cage, are presented. The purpose of this paper is to compare the structure of the flow behind the "squirrel" cages, as well as the analysis of the characteristics of the transition boundary layer for two different ways of locating the working surfaces: in the zone of the shearless core and shear periphery zone.

**Ключові слова:** періодична швидкісна нестационарність, генератор слідів «біляче» колесо, беззсувна течія, зсувна зона.

Бібліографія 5, рис. 4.

$D, R$  – діаметр та радіус «білячого» колеса;  
 $d$  – діаметр циліндра «білячого» колеса;  
 $U$  – швидкість;  
 $u'$  – повздовжня пульсація швидкості;  
 $x$  – відстань від передньої кромки пластини;  
 $x_0$  – відстань від циліндра «білячого» колеса до передньої кромки пластини;

$y$  – нормальна координата;  
 $Y$  – область розповсюдження слідів над поверхнею пластини;  
 $\delta$  – товщина примежового шару;  
 ЛТП – ламінарно-турбулентний перехід;  
 ПШ – примежовий шар.

Актуальність роботи обумовлена тим, що потоки з періодичною швидкісною нестационарністю за рухомими елементами набули широкого розповсюдження в різних технічних додатках (турбомашини, хімічне обладнання, технологічні лінії тощо). Зважаючи на складність процесів переносу, що протікають в нестационарних умовах, в багатьох практично важливих випадках фізичне моделювання залишається надійним інструментом для відтворення структури потоку, типової для реального обладнання.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Останнім часом багато дослідників експериментально і теоретично вивчали вплив періодичних слідів на характеристики теплового і динамічного примежового шару (ПШ), що розвивається на робочих поверхнях різного устаткування. Відомо, що течія в сліді характеризується наявністю дефекту швидкості і підвищеним ступенем турбулентності. При обертанні швидкісна періодична нестационарність сприяє додатковій інтенсифікації переносу. Обидва чинники (турбулентність і швидкісна періодична нестационарність) викликають більш ранній розвиток ламінарно-турбулентного переходу (ЛТП) [1, 2], який отримав назву слідового ЛТП. В огляді

[3] приведено детальний опис різних видів ламінарно-турбулентного переходу, в тому числі і слідового. Приймаючи до уваги складну взаємодію турбулізуючих ефектів різної природи характеристики такого переходу можуть бути визначені тільки експериментально.

Одним з найбільш поширених генераторів для моделювання періодичних слідів є «біляче» колесо [4]. Течія за «білячим» колесом характеризується наявністю двох областей: центрального беззсувного ядра і периферійної зсувної зони. Тому в залежності від розташування робочої поверхні щодо «білячого» колеса, можна організувати розвиток примежового шару в турбулізованому потоці зі зсувом і без зсуву. Автори експериментальних досліджень впливу швидкісної нестационарності на процеси переносу на обтічних поверхнях не завжди чітко описують умови, в яких розвиваються примежові шари, зокрема зазначають наявність беззсувного або зсувного потоку, що не дозволяє проводити коректне співставлення отриманих експериментальних даних.

**Метою даної роботи** є порівняння структури потоку за «білячими» колесами, а також аналіз особливостей перехідного примежового шару для двох різ-

них способів розташування робочих поверхонь. В якості останніх використовувалися плоскі пластини, встановлені на різних відстанях від центру «білячих» коліс: в зоні центрального беззсувного ядра або периферійної зсувної зони.

#### Опис експериментальних установок

Експерименти проводились в двох аеродинамічних трубах Інституту проточних машин академії наук Польщі (установка I) [5] і Інституту технічної теплофізики НАН України (установка II). В установці I плоска пластина (2) була встановлена в робочій ділянці ( $0,60 \times 0,46 \times 1,5 \text{ м}^3$ ) під кутом  $-2,5^\circ$  для запобігання відриву на передній кромці пластини (рис.1а). В установці II плоска пластина (2) була розташована в робочій ділянці ( $0,12 \times 0,12 \times 0,7 \text{ м}^3$ ) несиметрично так, що відстань від поверхні пластини до верхньої стінки складала 90 мм (рис.1б). Для організації безвідривного обтікання вхідної кромки пластини у вихідному перетині робочої частини аеродинамічної труби на верхній стінці кріпився інтерцептор 5 висотою 60 мм. Форми передніх кромок плоских пластин були також різними: в установці I вона була виконана у вигляді напівкліну з кутом  $30^\circ$  і потім закруглена радіусом 2 мм, в установці II – закруглена радіусом 1,5 мм. Діаметри «білячих» коліс  $D=2R$  та їх розташування відносно пластин були також різними. В установці I при  $D=200 \text{ мм}$  вісь обер-

тання колеса співпадала з горизонтальною віссю передньої кромки пластини. В установці II при  $D=70 \text{ мм}$  відстань між віссю обертання і передньою кромкою пластини складала 35 мм. При однакових діаметрах циліндрів  $d=3 \text{ мм}$  в обох установках відстані від найближчого циліндра до передньої кромки пластин були наступні: в установці I  $x_0=124 \text{ мм}$ , в установці II  $x_0=15 \text{ мм}$ . Область розповсюдження слідів над поверхнею пластини складала  $Y=D/2+d=103 \text{ мм}$  (I) і  $Y=D+d=73 \text{ мм}$  (II). Зазори між верхньою стінкою робочої ділянки і ободом «білячого» колеса були  $\sim 128 \text{ мм}$  (I) і тільки 20 мм (II). Частота обертання циліндрів складала приблизно  $f=4 \text{ Гц}$  (I) і  $5 \text{ Гц}$  (II), кількість циліндрів була 8 і 6 відповідно. Швидкість набігаючого потоку і природний рівень турбулентності (без «білячих» коліс) були при  $U_0=20 \text{ м/с}$   $Tu \sim 0,08\%$  (I) і при  $U_0=9 \text{ м/с}$   $Tu \sim 0,3\%$  (II).

Вимірювання структури потоку виконувались за допомогою термоанемометричної апаратури типу DISA-55M. В процесі проведення вимірювань апаратура дозволяла визначити тільки сумарну повздовжню пульсацію швидкості без виділення її турбулентної і періодичної складових.

#### Порівняння характеристик зовнішнього потоку

Характеристики зовнішнього потоку представлені у вигляді полів як середньої швидкості  $U/U_0 = f(y)$  і  $U/U_0 = f(y)$  (II), так і сумарних повздовжніх пульсацій

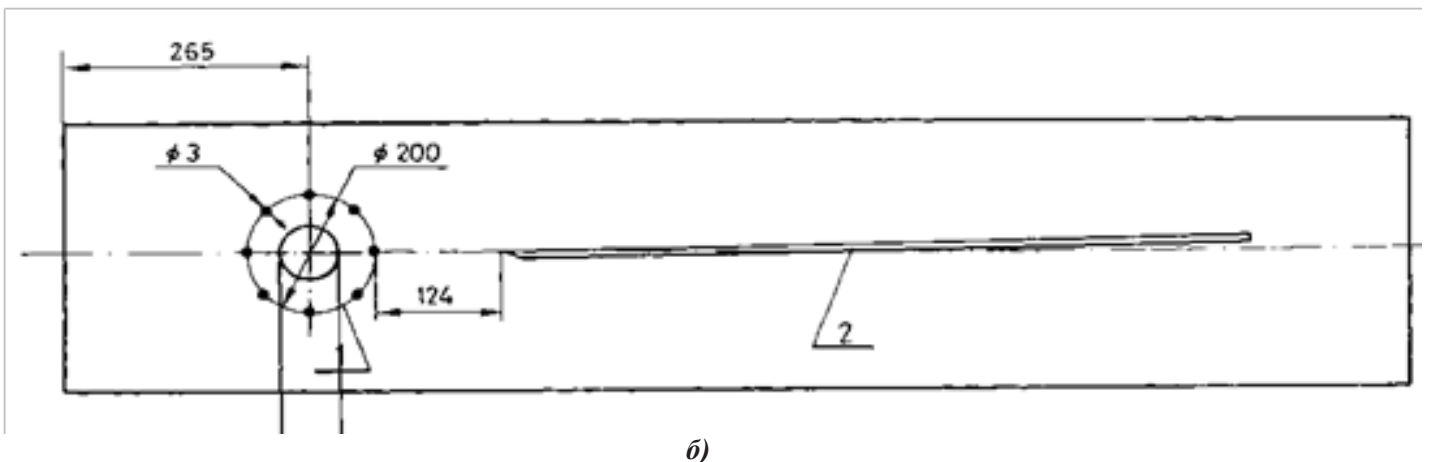
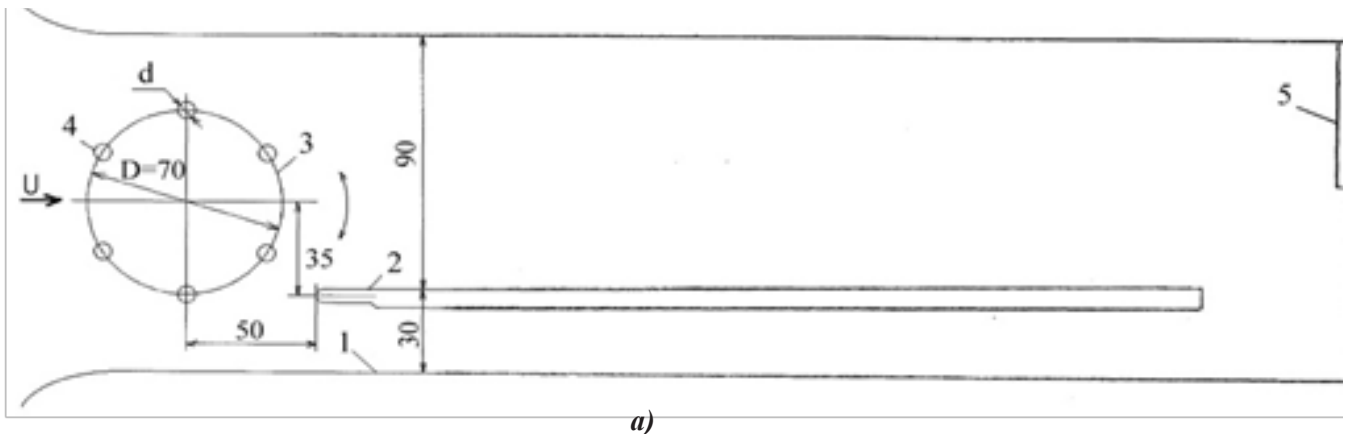


Рис. 1. Порівняння характеристик зовнішнього потоку: а) установка I; б) установка II.

$u/U_o$  (I) і  $u/U_e$  (II). Порівняння характеристик зовнішнього потоку проводилось на різних відстанях  $x$  вздовж пластин.

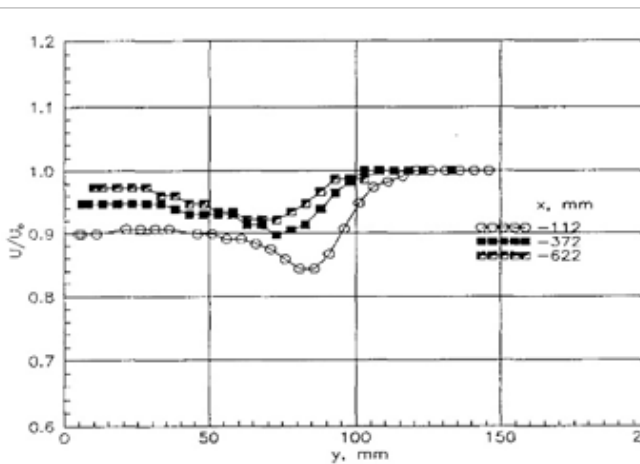
Результати вимірювання середньої в часі швидкості потоку за генератором слідів (рис.2а, 2б) показали, що на одних і тих же відносних відстанях від передньої кромки пластини  $X/Y \sim 2$  ( $x=112$  мм в (I) і  $x=100$  мм в (II),  $X=(x+x_0)$ ) розподіли характеризуються наявністю ядра течії з постійною швидкістю. В II це ядро розширюється вниз по течії, в той час як в I воно стає вузьким. Завдяки наявності зазору між ободом колеса і верхньою стінкою в I існує область, в якій  $U/U_o = 1$  при  $y/R > 1,3$ . В II «біляче» колесо займає практично більшу частину робочої ділянки над пластиною існує тільки область, де  $U/U_e = 1$  при  $y/R \sim 0,6-1,4$ .

В перерізах, вказаних вище ( $X/Y \sim 2$ ), в I дефект швидкості проявляється в виникненні мінімуму в розподілі швидкості (при  $y/R \sim 0,8$   $U_{min}/U_o = 0,84$ ) з відповідним відновленням рівномірності поблизу зовнішньої границі примежового шару (при  $y/R < 0,5$   $U_e/U_o = 0,9 = const$ ). Таким

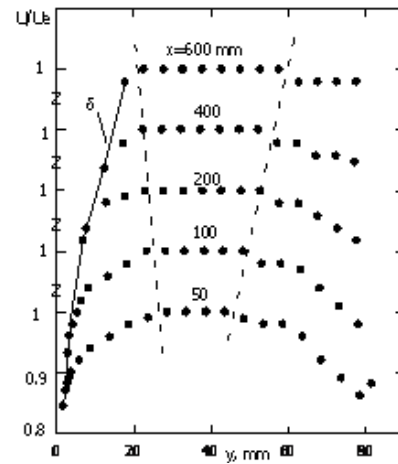
чином, в I формування примежового шару відбувається в умовах беззсувного зовнішнього потоку ( $U_e = const$ ), незважаючи на присутність швидкісної нестационарності, що індукована слідами. Товщина примежового шару  $\delta$  в цьому випадку визначається як звичайно умовою  $U_\delta = 0,99U_e$ .

В II формування примежового шару відбувається в зсувному потоці при  $U/U_e = var$ . Мінімум швидкості, що викликаний слідом, знаходиться поблизу зовнішньої границі примежового шару. При таких умовах товщина ПШ визначається як точка перегину в профілі швидкості, в якій  $dU/U_\delta = 0$ . В інших перерізах по довжині пластини тенденція до збереження рівномірного ядра течії залишається.

Поле сумарних повздовжніх пульсацій характеризується наявністю піків, які виникають в зовнішньому потоці в результаті перетину слідів (рис.3). В I середній рівень  $u'/U_o$  змінюється від  $\sim 6\%$  до  $3,5\%$  при  $x=112-622$  мм (рис.3а). В той же час в II він досягає  $\sim 12\%$  і зменшується до  $4,5\%$  при  $x=100-600$  мм (рис.3б).

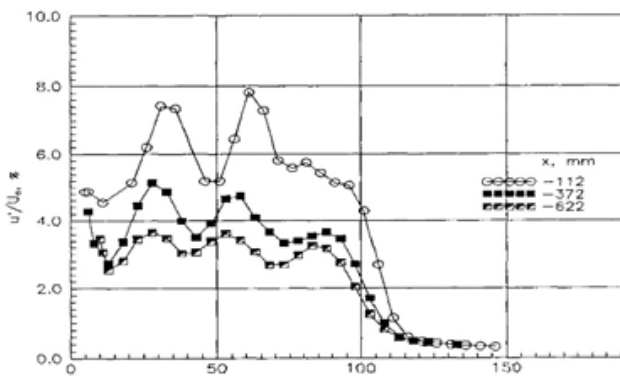


а)

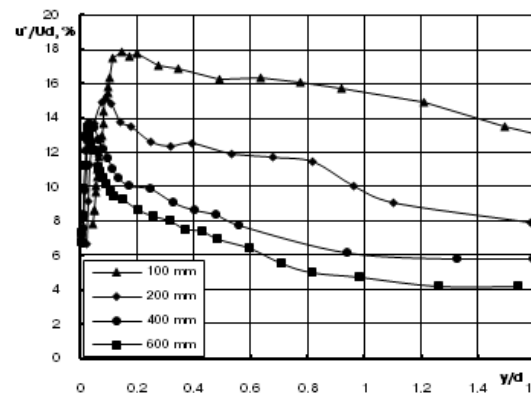


б)

Рис. 2. Розподіли середньої швидкості за генератором слідів: а) установка I; б) установка II.



а)



б)

Рис. 3. Розподіли пульсацій швидкості в зовнішньому потоці за «білячим» колесом: а) установка I; б) установка II.

В першу чергу різницю в величинах  $u'/U_e$  можна пояснити різною відстанню  $x+x_0$  між обраним перерізом і «білячим» колесом. Необхідно відмітити, що в обох випадках відношення максимумів амплітуд до мінімумів не перевищує  $\sim 1,4-1,5$  при  $x \sim 100$  мм і  $1,2-1,3$  при  $x \sim 600$  мм.

Попередні розрахунки показали, що зміна осереднених величин сумарних повздовжніх пульсацій швидкості в ядрі течії за «білячим» колесом може бути описана звичайними законами виродження, широко розповсюдженими для описання затухання турбулентності за решітками в стаціонарних потоках [4]:

$$\frac{U_e^2}{u^2} = A(X + X_0)^m,$$

де в першому наближенні  $m=1,2$ ,  $A=4,1$  та  $4,6$ ,  $X_0=117$  та  $7,1$  мм для установок I і II відповідно.

На базі закону затухання можливо розрахувати кінетичну енергію пульсацій, їх дисипацію та характерні масштаби, а також оцінити турбулентну в'язкість турбулізованої течії  $\nu_{te}$  в рамках турбулентної моделі «енергя-дисипація». Як показали розрахунки, для установки II величина турбулентної в'язкості змінюється по довжині пластини від  $2,7 \cdot 10^{-3}$  до  $1,4 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с, тобто перевищує молекулярну в'язкість майже в 200 разів при  $x=50$  мм. Ці особливості зовнішнього потоку з періодичною швидкісною нестаціонарністю необхідно брати до уваги при розрахунках процесів переносу течій, наприклад, в турбомашиних, на базі моделей турбулентності.

**Порівняння характеристик примежового шару**

Спеціальні експериментальні методи, наведені в [2] для діагностики режимів течії, підтвердили існування псевдоламінарного, перехідного і турбулентного примежових шарів на поверхні пластини. В обох установках перед початком ламінарно-турбулентного переходу, що викликаний слідами (слідового переходу), мав місце розвиток псевдоламінарного ПШ. В псевдоламінарному ПШ профілі середньої швидкості відрізняються від профілю Блазіуса збільшеними градієнтами біля стінки. По довжині пластини трансформація профілів

від псевдоламінарного до турбулентного була подібна випадку байпасного переходу, який описаний в [2]. В процесі переходу в профілі швидкості виникає область логарифмічного закону, яка розширюється по напрямку до зовнішньої границі ПШ, аж до формування турбулентного ПШ. Таким чином існує повна аналогія в розвитку профілів швидкості між байпасним і слідовим переходами.

Розподіли сумарних повздовжніх пульсацій швидкості в ПШ показують принципову різницю в експериментах I і II (рис.4).

В I в розподілі сумарних повздовжніх пульсацій спостерігаються два піки (рис.4а). В перерізі  $x=112$  мм перший з них з амплітудою  $u'/U_e \sim 11\%$  розташований при  $y/\delta \sim 0,15$ , а другий пік з амплітудою  $u'/U_e \sim 10\%$  - при  $y/\delta \sim 0,55$ . Появу останнього можна вважати результатом взаємодії примежового шару і зовнішнього потоку, коли рівень турбулентності невисокий і переважає роль грає важливу роль. По довжині пластини другий пік слабшає і поступово зникає, в той час як перший пік зсувається до стінки і досягає розташування, типового для турбулентного ПШ. Хоча деталі механізму виникнення піків потребують подальшого дослідження, існування мінімуму повздовжніх пульсацій між піками при  $y/\delta \sim 0,3$  можуть бути частково пояснені різними причинами. Серед них зміна фази кінетичної енергії в критичному примежовому шарі [2], перерозподіл енергії між повздовжньою і нормальною компонентами, і т.п.

В II в розподілі сумарних повздовжніх пульсацій спостерігається тільки один пік (рис.4б). В перерізі  $x=100$  мм його амплітуда складає  $u'/U_e \sim 17,5\%$  при  $y/\delta \sim 0,2$ . По довжині пластини в процесі переходу цей пік наближається до стінки і в турбулентному ПШ також розташовується при  $y^+ \sim 12-13$ .

**Висновки і перспективи**

Фізичне моделювання потоку з періодичною швидкісною нестаціонарністю виконано в двох експериментальних установках. Показано, що за обертовими «білячими» колесами в розподілах середньої швидкості існують дві області: беззсувне ядро, розташоване за

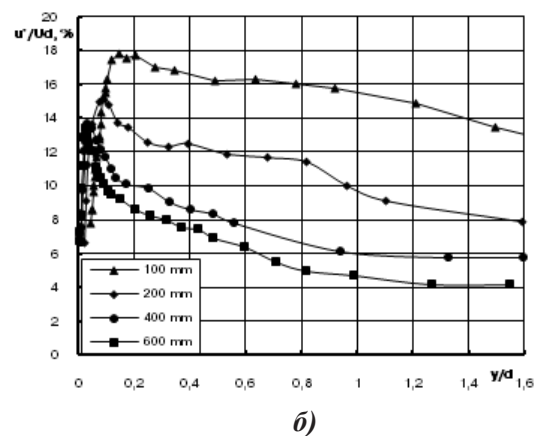
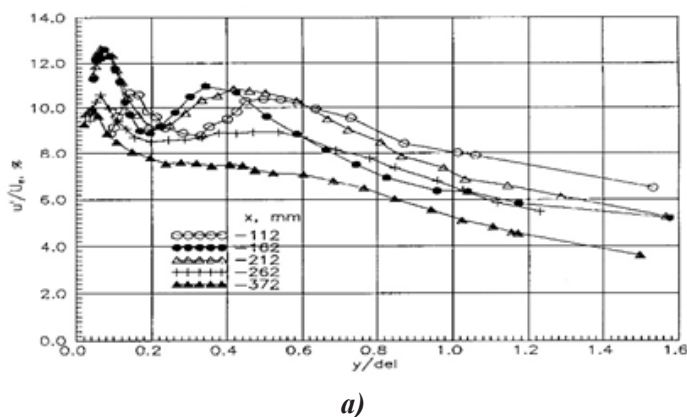


Рис. 4. Розподіл пульсацій швидкості в примежовому шарі: а) установка I; б) установка II



центральною частиною колеса, і периферійна зсувна зона.

Сумарні повздовжні пульсації швидкості характеризуються наявністю піків, причиною яких є перетин слідів. За «білячими» колесами по довжині пластини при  $x \sim 100-600$  мм рівень пульсацій змінюється від  $\sim 12$  до  $4,5\%$  (установка II) і від  $\sim 6$  до  $3,5\%$  (установка I).

Отримані осереднені величини сумарних повздовжніх пульсацій швидкості в ядрі течії за «білячим» колесом дозволяють розрахувати кінетичну енергію пульсацій, їх дисипацію та характерні масштаби, а також оцінити турбулентну в'язкість турбулізованої течії. Ці дані необхідні при розрахунках процесів переносу течій з періодичною швидкісною нестационарністю, наприклад, в турбомашині, на базі моделей турбулентності.

Незважаючи на те, що розвиток примежового шару відбувається при різних зовнішніх умовах (в беззсувному (I) і зсувному (II) потоках), слідовий перехід виникає в обох установках. Трансформація профілів швидкості від псевдоламінарного до турбулентного подібна тому, що має місце в байпасному переході.

Розподіли сумарних повздовжніх пульсацій в примежовому шарі різняться кількістю піків і їх інтенсивністю.

В даний час фізичне моделювання є одним з найбільш перспективних методів для вивчення процесів переносу, що відбуваються в складних умовах. Отримані експериментальні результати можуть бути застосовані

при розробці надійних методів прогнозування та розрахунку слідового ламинарно-турбулентного переходу, що, в свою чергу, сприятиме вдосконаленню проточної частини газових турбін або іншого теплоенергетичного обладнання.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Schobeiri M.T., Chakka P.* Prediction of turbine blade heat transfer and aerodynamics using a new unsteady boundary layer transition model. *Int. J. Heat and Mass Transfer.* 2002. Vol. 45. P. 815–829.2.

2. *Epik E.Ya., Suprun T.T., Wiercinski Z.* Some features of mechanism of laminar-turbulent transition induced by wakes. *Eurasian Physical Technical Journal.* 2006. Vol.3. No. 1(5).P. 54–58.3.

3. *Erik Dick, Slawomir Kubacki.* Transition Models for Turbomachinery Boundary Layer Flows: A Review. *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power.* 2017. Vol. 2, Issue 2. P. 1-45; doi:10.3390/ijtp2020004.

4. *Suprun T.* Physical modeling the unsteady flow with wakes. *Eurasian Physical Technical Journal.* 2017. Vol.14. No. 2(28). P.113 - 119.

5. *Wiercinski Z., Epik E., Suprun T.* Heat transfer in the presence of periodic wakes. *Промышленная теплотехника (приложение к журналу).* 2003. Т.25. №4. С.296-300.

**MODELLING OF SHEAR AND SHEARLESS  
FLOW WITH PERIODIC VELOCITY  
NONSTATIONARITY**

**Suprun T.T.**

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

The physical modelling of turbulized flow with velocity periodic nonstationarity is carried out in two experimental installations. It is shown that behind rotating “squirrel” cages there are two regions in the distributions of mean time velocities: the shearless flow core located in the center of “squirrel” cage and peripheral shear part.

The aim of this paper is to compare the flow structure behind “squirrel” cages as well as to analyze the features of transient boundary layer for two different installations of working surfaces. The latter were flat plates installed on the different distances from the center of the “squirrel” cages: in the shearless flow core and in shear zone.

Total longitudinal fluctuations are characterized by peaks reason of which is intersections of wakes. Behind the “squirrel” cages the levels of fluctuations decrease along the plates at  $x \sim 100-600$  mm from  $\sim 12$  to  $4,5\%$  (II) and from  $\sim 6$  to  $3,5\%$  (I).

Despite the development of boundary layer happens under different external conditions (in uniform (I) and shear (II) flows), wake-induced transition takes place in both installations. Transformation of velocity profiles from pseudolaminar to turbulent is similar to one taking place in bypass transition.

Distributions of total longitudinal fluctuations across the boundary layer differ by quantity of peaks and their intensity.

Today the physical modeling is one of the most perspective methods for studying transport processes under complex conditions. That is why the experimental investigations of periodic external flow structure are necessary for the further optimization of different equipment and their reliability enhancement.

**Keywords:** avelocity periodic nonstationarity, generator of wakes “squirrel” cage, the shearless flow core, shear zone.

1. *Schobeiri M.T., Chakka P.* Prediction of turbine blade heat transfer and aerodynamics using a new unsteady boundary layer transition model. *Int. J. Heat and Mass Transfer.* 2002. Vol. 45. P. 815–829.

2. *Epik E.Ya., Suprun T.T., Wiercinski Z.* Some features of mechanism of laminar-turbulent transition induced by wakes. *Eurasian Physical Technical Journal.* 2006. Vol.3. No. 1(5). P. 54–58.

3. *Erik Dick, Slawomir Kubacki.* Transition Models for Turbomachinery Boundary Layer Flows: A Review. *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power.* 2017. Vol. 2, Issue 2. P. 1-45; doi:10.3390/ijtp2020004.

4. *Suprun T.* Physical modeling the unsteady flow with wakes. *Eurasian Physical Technical Journal.* 2017. Vol.14. No. 2(28). P.113 - 119.

5. *Wiercinski Z., Epik E., Suprun T.* Heat transfer in the presence of periodic wakes // *Promyshlennayateplotekhnika (prilozheniyekzhurnal)* [Industrial Heat Engineering (appendix to the journal)]. 2003. V.25. №4. P.296-300. (Eng.)

*Отримано 17.05.2018*

*Received 17.05.2018*