

УДК 532.525.6

**ВПЛИВ СТРУКТУРИ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПОТОКУ НА
ТЕПЛООБМІН У ПЕРЕХІДНОМУ ПОГРАНИЧНОМУ ШАРІ**

Т. Т. Супрун, кандидат технічних наук

Інститут технічної теплофізики НАН України

e-mail: suprun@biomass.kiev.ua

Анотація. *Представлені результати експериментальних досліджень теплообміну і структури нестационарної течії за нерухомим і обертовим «білячим» колесом. Удосконалено методику вимірювань у потоках зі швидкісною нестационарністю, що дозволило розділити сумарну збуреність потоку на її складові (турбулентну і нестационарну моди). На основі розподілу локальних коефіцієнтів тепловіддачі підтверджено виникнення слідового ламінарно-турбулентного переходу верхнього типу та встановлено його місце розташування на робочій поверхні.*

Ключові слова: *теплообмін, ламінарно-турбулентний перехід, турбулентність, швидкісна періодична нестационарність, інтенсифікація теплообміну*

При проектуванні теплоенергетичного обладнання різного призначення необхідно мати достовірні дані про зміни локальних коефіцієнтів переносу і температурний стан робочих поверхонь. Оскільки в проточній частині такого обладнання розвиток примежового шару (ПШ) відбувається в складних умовах нелінійної взаємодії турбулізуючих ефектів різної природи, на обтічних поверхнях під впливом збурюючих потоків виникають так звані псевдоламінарні і квазітурбулентні ПШ, які характеризуються інтенсифікацією процесів переносу [1]. При виникненні ламінарно-турбулентного переходу (ЛТП) зростання теплообміну в псевдоламінарному ПШ може привести до виникнення так званого верхнього теплового байпасного ЛТП, характерного

монотонною зміною локальних коефіцієнтів тепловіддачі вздовж поверхні і наближенням до турбулентного або квазітурбулентного ПШ «зверху» [2].

Течія в проточній частині турбін характеризується наявністю періодичних слідів, що виникають на задній кромці кожної турбінної лопатки.

Проходячи через наступні ряди лопаток (зокрема, ротор), сліди впливають на розвиток ПШ на поверхні лопаток, на ефективність рядів лопаток, їх тепловіддачу і профільні втрати. При проектуванні проточної частини газових турбін особливе практичне значення набуває вирішення питання про те, чи виникає верхній тепловий ЛТП на поверхнях робочих і соплових лопаток в нестационарних умовах. Особливістю течії в сліді необхідно вважати підвищений ступінь турбулентності Tu_e при наявності дефекту швидкості. При обертанні швидкісна періодична нестационарність сприяє додатковій інтенсифікації переносу. Обидва чинники ($Tu_e > 0$ і швидкісна періодична нестационарність) викликають більш ранній розвиток ЛТП, який отримав назву слідового ЛТП. Приймаючи до уваги складну взаємодію турбулізуючих ефектів різної природи характеристики такого переходу можуть бути визначені тільки експериментально.

Вирішенню цього актуального завдання сприяють представлені нижче експериментальні результати.

При фізичному моделюванні слідового ЛТП умови роторно-статорної взаємодії в турбомашині відтворюються за допомогою «білячого» колеса [3-5] або циліндра, що коливається [6, 7]. З аналізу цих робіт витікає, що саме високі значення Tu_e , а не дефект швидкості несуть основну відповідальність за перебіг слідового ЛТП. Цей факт підтверджує спільність окремих аспектів слідового і байпасного ЛТП, що дозволяє використовувати досвід, накопичений раніше в ІТТФ НАНУ в ході досліджень байпасного ЛТП [8], до слідового ЛТП.

Мета досліджень – визначення характеристик слідового ЛТП та вплив на них швидкісної періодичної нестационарності, яка моделюється за допомогою «білячого» колеса. Для порівняння розглядався природний ЛТП без впливу

нестационарності. Значну увагу приділено структурі нестационарного потоку, що формується за генераторами слідів.

Завдання експериментального дослідження:

- Визначити параметри структури нестационарної течії за нерухомим і обертовим «білячим» колесом (поля швидкості та пульсацій швидкості).
- Удосконалити методику вимірювань в потоках зі швидкісною нестационарністю, що дозволить розділити сумарну збуреність потоку на її складові (турбулентну і нестационарну моди).
- Отримати розподіл коефіцієнтів тепловіддачі по довжині поверхні та встановити координати слідового ЛТП на робочій поверхні, а також оцінити вплив на них нестационарності потоку.

Матеріали та методика досліджень. Експерименти проводилися в аеродинамічній трубі Т-5 ІТТФ НАНУ відкритого типу (рис. 1) з робочою частиною 1 перерізом $120 \times 120 \text{ мм}^2$ і довжиною 700 мм. Робочою поверхнею служила плоска пластинка 2, встановлена в робочій ділянці несиметрично. Для організації безвідривного обтікання вхідної кромки пластинки, закругленою радіусом 1.5 мм, у вихідному перетині робочої частини аеродинамічної труби на верхній стінці кріпився інтерцептор 5 висотою 60 мм.

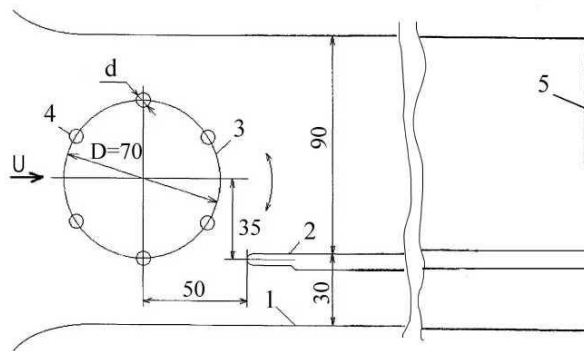


Рис. 1. Схема установки «білячого» колеса

«Біляче» колесо 3 було виготовлено з шести аналогічних циліндрів 4 із зовнішнім діаметром $d = 3 \text{ мм}$, розташованих рівномірно по колу. Діаметр обода колеса становив $D = 70 \text{ мм}$, а його ширина (довжина встановлених

циліндрів) – 118 мм. Вісь обертання генератора була розташована на відстанях $x = -50$ мм і $y = 35$ мм від осі передньої кромки пластини. Проміжок між ободом колеса і верхньою кришкою робочої частини труби складає всього 20 мм і практично відсутній над пластиною.

Нерухоме «біляче» колесо фіксувалося в трьох різних позиціях залежно від розташування циліндрів на ободі колеса відносно передньої кромки пластини. Позиція «а», зображена на рис. 1, є вихідною. Двом іншим позиціям «б» і «в» відповідають повороти колеса на $\pm 90^\circ$ і на 15° за годинниковою стрілкою.

Обертання «білячого» колеса здійснювалося реверсивним двигуном з редуктором, з'єднаним із віссю колеса гнучким валом. Швидкість обертання колеса становила $n = 50$ об/хв, що відповідало частоті обертання циліндрів $f = 5$ Гц. При зміні напрямку обертання колеса сліди від циліндрів могли рухатися як на пластину, так і від неї.

Дослідження теплообміну проводилися електроколометричним методом. Граничні умови на поверхні пластини були близькі до $q_w = \text{const}$. Для вимірювань структури потоку використовувалася апаратура DISA-55M. Як визначальна була обрана швидкість на вході в робочу частину труби 9 м/с.

Всього було проведено 3 серії експериментів: за відсутності «білячого» колеса (серія 1, природний ЛТП при $Tu_e = 0,2-0,4$ %), при трьох установах нерухомого колеса (серії 2 а, б, в) і при обертанні колеса (серія 3).

Метод розділення енергій пульсацій. Оскільки в процесі проведення вимірювань апаратура дозволяла визначити тільки сумарну повздовжню пульсацію швидкості u'_e , для виділення турбулентної u'_t і періодичної u'_n компонент був розроблений спеціальний метод. Метод заснований на двох наступних гіпотезах, що мають експериментальне підтвердження.

Перша з цих гіпотез припускає відсутність кореляції енергій збурень різної природи. У цьому випадку сумарна енергія поздовжніх пульсацій

швидкості зовнішнього потоку $\overline{u_e'^2}$ пов'язана з енергіями турбулентної $\overline{u_t'^2}$ і нестационарної $\overline{u_n'^2}$ складових, як:

$$\overline{u_e'^2} = \overline{u_t'^2} + \overline{u_n'^2}. \quad (1)$$

Друга гіпотеза припускає, що наявність обертання практично не змінює або дуже слабо відбивається на початковій стаціонарній турбулентній структурі потоку. У цьому випадку, провівши відповідні вимірювання на нерухомому об'єкті і отримавши дані про розподіли турбулентної пульсації u_t' , нестационарна складова визначається, як:

$$u_n' = \sqrt{\overline{u_e'^2} - \overline{u_t'^2}}. \quad (2)$$

При такому підході для визначення u_t' вимірюванням в потоках з обертаним генератором обов'язково повинні передувати аналогічні вимірювання на тому ж нерухомому генераторі. При обертанні генератора вимірюється сумарна пульсація u_e' і за рівнянням (2) розраховується внесок періодичної моди u_n' .

Метод осереднення гідродинамічних характеристик потоку. Відомо, що за встановленими генераторами слідів формується потік, характерний нерівномірними полями швидкості (через наявність дефекту швидкості) і поздовжніх пульсацій. Для кількісного опису такого потоку необхідно провести осереднення зазначених гідродинамічних характеристик. При реалізації цієї процедури найбільш важливим є виділення області осереднення.

Осереднення швидкості зовнішнього потоку і її повздовжньої пульсації проводилося в діапазоні значень від $y = \delta$ (тобто від зовнішньої границі динамічного ПШ, утвореного на поверхні) до кінця області поширення слідів. У випадку «білячого» колеса при даній установці пластини кінець цієї області відповідав значенню $(D + d)$. Таким чином, осереднені значення швидкості і пульсації розраховувалися як:

$$U_e = \frac{1}{(d + D) - \delta} \int_{\delta}^{d+D} U dy, \quad (3)$$

$$u'_e = \frac{1}{(d + D) - \delta} \int_{\delta}^{d+D} u' dy. \quad (4)$$

Результати досліджень. Розподіл швидкості при нерухомому «білячому» колесі свідчить про виникнення як зсувної (у серіях 2, б і 2, в), так і беззсувної (у серії 2, а) течії поблизу зовнішньої границі ПШ залежно від взаємного розташування циліндрів на ободі колеса відносно передньої кромки пластини.

За наявності обертання «білячого» колеса розподіл швидкості зовнішнього потоку $U/U_e = f(y)$ в кожному перетині по довжині пластини характеризувався наявністю двох зон: беззсувного ядра з постійною швидкістю ($U/U_e \approx 1$) і зсувної течії поблизу зовнішньої границі ПШ. Таким чином, формування ПС відбувалося при $U/U_e = \text{var}$ в умовах $U/U_e < 1$.

Мінімум швидкості, викликаний слідами і розташований поблизу зовнішньої границі ПШ, ускладнював вибір його товщини. У цих умовах остання визначалася по точці перегину в профілі швидкості, в якій $dU/dy = 0$.

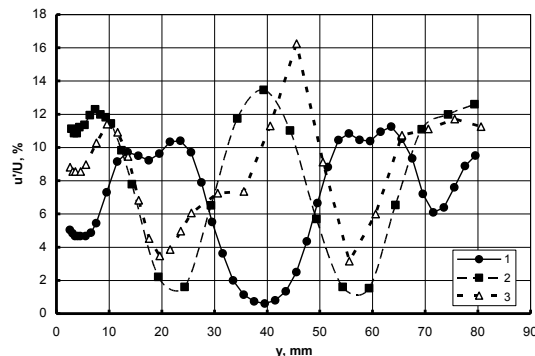


Рис. 2. Розподіл пульсацій за нерухомим «білячим» колесом при $x=50$ мм:

1 – серія 2,а; 2 – 2,б; 3 – 2,в

Розподіли повздовжньої пульсації швидкості за нерухомим «білячим» колесом залежали від його установки. У позиції «а» (рис. 2) при співпадінні

ближніх і дальніх слідів за двома циліндрами спостерігалися максимуми пульсації, що досягають $u'_{\max}/U_e=11\%$. При установках «білячого» колеса в позиції «б» і «в» їх амплітуда була вище в порівнянні з попереднім випадком ($u'_{\max}/U_e=13\%$ і $12-16\%$ відповідно). По довжині пластини амплітуда максимумів зменшувалася і досягала $\sim 4-4,5\%$ при $x=600$ мм. Таким чином, розподіли поздовжніх пульсацій швидкості по довжині пластини переставали залежати від позицій установки нерухомого «білячого» колеса.

У результаті взаємного перетину слідів циліндрів за обертовим «білячим» колесом в розподілах сумарною поздовжньої пульсації швидкості в кожному перетині по довжині пластини ($x=50-600$ мм) в зовнішньому потоці з'являються окремі піки (рис. 3), амплітуда яких зменшується від $13-16\%$ до $4,5-5\%$ по мірі віддалення від джерела збурень. Загальною очікуваною тенденцією є затухання поздовжніх пульсацій за генератором.

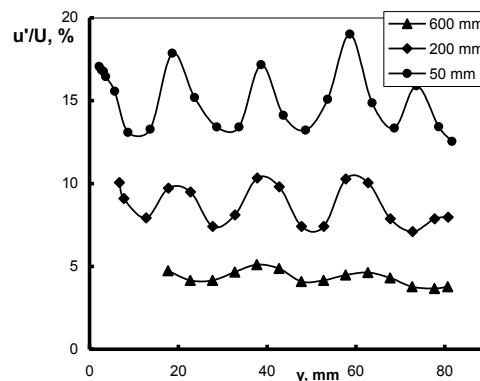


Рис. 3. Розподіл пульсацій швидкості за обертовим «білячим» колесом

Осереднення швидкості і поздовжніх пульсацій зовнішнього зсувного потоку за рівняннями (3) і (4) дозволило провести його заміну еквівалентним беззсувним аналогом.

При осередненні виміряних розподілів сумарних (рис. 3) і турбулентних (рис. 2) пульсацій зовнішнього потоку усереднені характеристики нестационарного зовнішнього потоку можна розглядати як сумарну і

турбулентну складові еквівалентного беззсувного потоку. Такий підхід згідно з рівнянням (2) дозволив розрахувати нестационарну складову еквівалентного беззсувного аналога і кількісно оцінити її величину.

Як показали розрахунки, в еквівалентному беззсувному потоці по довжині пластини в діапазоні $x=50-600$ мм нестационарна мода зменшується від $\sim 12\%$ до $2,5\%$, тоді як турбулентна мода змінюється від $\sim 9\%$ до $3,7\%$, а сумарна поздовжня пульсація – від $\sim 15\%$ до $4,5\%$.

Аналіз наведених даних свідчить, що нестационарна мода затухає істотно швидше турбулентної. У початкових перетинах пластини основний внесок у сумарну поздовжню пульсацію швидкості зовнішнього потоку вносить нестационарна мода, тоді як при $x > 150$ мм переважаючою виявляється турбулентна.

Розподіли локальних коефіцієнтів тепловіддачі по довжині пластини у вигляді залежностей $St = f(Re_x)$ представлені на рис. 4.

При відсутності «білячого» колеса (серія 1) ламінарний ПШ займає більшу частину поверхні, а область ЛТП розташовується в діапазоні чисел Рейнольдса $Re_{xst} - Re_{xend} = 2 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^5$.

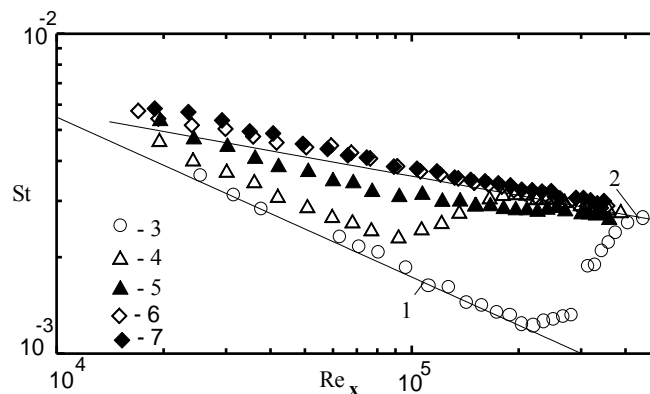


Рис. 4. Розподіл локальних коефіцієнтів тепловіддачі:

1 – $St=0.55Re_x^{-0.5}$, 2 – $St=0.0344Re_x^{-0.2}$, 3 – серія 1, 4 – нерухомий циліндр [6], 5 – циліндр, що коливається [6], 6 – серія 2а, 7 – серія 3

Для порівняння на рис. 4 також представлені розподіли коефіцієнтів тепловіддачі за іншими генераторами нестационарності: нерухомим циліндром і

циліндром, що коливається, які були отримані в попередніх роботах ІТТФ НАН України. Аналіз розподілів локальних коефіцієнтів тепловіддачі показує різний характер слідового ЛТП, але цей розподіл носить немонотонний характер.

У серіях 2,а і 3 за нерухомим і обертовим «білячим» колесом розподіл коефіцієнтів тепловіддачі набуває монотонний характер, незважаючи на існування слідового ЛТП верхнього типу, підтвердженого розробленими в ІТТФ НАНУ методами [8]. У цих серіях при $Re_x=2\cdot 10^4-4\cdot 10^4$ інтенсифікація теплообміну в псевдоламінарному ПШ досягає 1,4-1,67 і 1,49-1,78, а область слідового ЛТП розташовується в діапазоні $Re_{xst} - Re_{xend} = 5,2\cdot 10^4-1,92\cdot 10^5$ і $4,5\cdot 10^4-1,55\cdot 10^5$ відповідно. Таким чином, нестационарність в значно більшій мірі впливає на координати зони слідового ЛТП, ніж на інтенсивність теплообміну в ПШ.

Висновки

Удосконалено методику вимірювань в нестационарних потоках, проведено розділення сумарної збуреності на турбулентну і нестационарну моди, визначено характеристики беззсувного еквівалентного зовнішнього потоку.

На основі розподілів коефіцієнтів тепловіддачі за нерухомим і обертовим «білячим» колесом підтверджено виникнення слідового ЛТП верхнього типу, встановлено його місце розташування; оцінена інтенсифікація теплообміну в псевдоламінарному ПШ.

Отримані експериментальні результати можуть бути застосовані при розробці надійних методів прогнозування та розрахунку слідового ЛТП, що, в свою чергу, сприятиме вдосконаленню проточної частини газових турбін або іншого теплоенергетичного обладнання.

Список літератури

1. Дыбан Е. П. Тепломассообмен и гидродинамика турбулизованных потоков / Е. П. Дыбан, Э. Я. Эпик. – К.: Наук. думка, 1985. – 296 с.

2. Dyban E.P. Heat transfer of plate in the presence of laminar-turbulent transition and increased turbulence of the external flow: proc. inter. Symposium / E. P. Dyban, E. Ya. Epik, T. T. Suprun, S. V. Kuimov // Turbulence, Heat and Mass Transfer. – Lisbon (Portugal), 1994. – Vol. 2. – P.1.12.1–1.12.4.

3. Wright L. The effect of periodic unsteady flow on aerodynamics and heat transfer on a curved surface / L. Wright, M. T. Schobeiri // J. Heat Transfer. – 1999. – Vol. 121. – P.22-33.

4. Liu X. Experiments on transitional boundary layer with wake-induced unsteadiness / X. Liu, W. Rodi // J. Fluid Mech. – 1991. – Vol. 231. – P. 229-256.

5. Epik E.Ya. Generation of turbulized flow with velocity periodic nonstationarity in working part of aerodynamic tube / E. Ya. Epik, T. T. Suprun // XVI ICMAR - Kazan (Russia). – 2012. – Part 1. – P. 80-81.

6. Верцинский З. Характеристики ламинарно-турбулентного перехода, индуцированного следом одиночного движущегося цилиндра / З. Верцинский, Т. Супрун, Э. Эпик // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т.23, №3. – С.22-30.

7. Эпик Э. Я. Влияние следов за цилиндрами на характеристики ламинарно-турбулентного перехода: Тр. ХУП Школы семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева / Э. Я. Эпик, Т. Т. Супрун // Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2009. – С. 38-41.

8. Epik E.Ya. Heat transfer and diagnostics of bypass laminar-turbulent transition : Proc. of 3rd Int. Symp. / E.Ya. Epik, T.T. Suprun // Turbulence, Heat and Mass Transfer. – Nagoya (Japan). – 2000. – P. 1-8.

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОТОКА НА
ТЕПЛООБМЕН В ПЕРЕХОДНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ**

Т. Т.Супрун

Аннотация. *Представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена и структуры нестационарного течения за неподвижным и вращающимся «беличьим» колесом. Усовершенствована методика измерений в потоках со скоростной нестационарностью, позволившая разделить суммарную возмущенность потока на ее составляющие (турбулентную и нестационарную моды). На основе распределения локальных коэффициентов теплоотдачи подтверждено возникновение следового ламинарно-турбулентного перехода верхнего типа и установлено его местоположение на рабочей поверхности.*

Ключевые слова: *теплообмен, ламинарно-турбулентный переход, турбулентность, скоростная периодическая нестационарность, интенсификация теплообмена*

INFLUENCE OF UNSTEADY FLOW STRUCTURE ON HEAT TRANSFER IN TRANSITIONAL BOUNDARY LAYER

T. Suprun

Annotation. *The results of experimental investigations of heat transfer and the structure of unsteady flow after still and rotating "squirrel cage" are presented. On the basis of experimental investigations the methodic of division of turbulent and nonstationary modes in unsteady flows is proposed. The characteristics of equivalent shearless external flow are given. The existence of wake induced laminar-turbulent transition of upper type is confirmed and its region is fixed. The intensity of heat transfer in boundary layers is estimated.*

Keywords: *heat transfer, laminar-turbulent transition, turbulence, periodic velocity instability, heat transfer intensification*