

УДК 533.6.08

О.В. Семеняко, асист., ORCID 0000-0002-9097-1358

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧІЇ В МІЖРЕБЕРНИХ КАНАЛАХ ПЛОСКО-ОВАЛЬНИХ ТРУБ

Проведені експериментальні термоанемометричні дослідження характеристик течії – осереднених у часі швидкостей та їх середньоквадратичних пульсацій у міжреберних каналах моделі плоско-овальної труби з неповним оребренням при її омиванні потоком повітря. Представлено опис експериментальної установки та методики досліджень. Отримано розподіл полів локальних осереднених у часі швидкостей та середньоквадратичних пульсацій швидкості в центральній площині міжреберного каналу. Проведений аналіз умов інтенсифікації локального теплообміну на поверхнях плоско-овальних труб з неповним оребренням. Виявлено, що течія в міжреберному каналі має складний тривимірний характер. Показано, що за характером течії в міжреберному просторі поверхня ребра може бути уявно розділена по його висоті на дві частини. Виявлено три типи відриву на поверхні ребра – біля гострої вхідної крайки, при взаємодії перехресних потоків та в місцях стикування поверхонь ребра і криволінійної частини труби. Показано, що наявність областей підвищеної інтенсивності локального теплообміну пов'язана з гідродинамічними особливостями течії – генерацією потужного вихорового джгута і його розвитком вздовж прикореневої частини ребра.

Ключові слова: плоско-овальна труба, ребро, канал, течія, термоанемометрія, швидкість, пульсація

Вступ

Важливим напрямом вирішення задач ресурсо- та енергозбереження, пов'язаних зі значним подорожчанням матеріальних та енергетичних ресурсів, є розробка та впровадження нових типів розвинених конвективних поверхонь нагрівання, що відрізняються високою теплоаеродинамічною ефективністю. В зв'язку з цим в „КПІ ім. Ігоря Сікорського” розроблені та впроваджені теплообмінні поверхні у вигляді поперечно-оребrenних труб [1]. Такі труби виготовляються з вуглецевої сталі і представляють собою плоско-овальні труби, що несуть оребрення, до плоских частин котрих методом контактного зварювання приєднані прямокутні ребра (рис. 1). Як показано в [2] плоско-овальні труби з неповним оребренням мають високі теплоаеродинамічні характеристики, які можуть бути порівнянні з характеристиками біметалевих круглоребристих труб з високими коефіцієнтами оребрення.

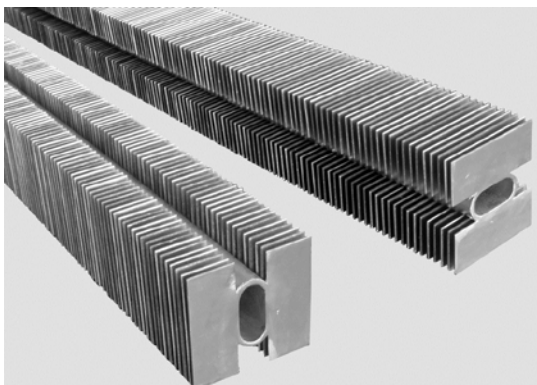


Рисунок 1 – Плоско-овальні труби з неповним поперечним оребренням

Останнім часом в іноземній літературі з'явилися результати досліджень теплообміну та аеродинаміки схожих типів поперечно-оребrenних труб (згідно з термінологією авторів „H-type finned tubes”): круглих [3 - 5] з оребренням пелюсткового типу [6] та овальних [7-8]. Більшість представлених робіт [3 - 5, 7] носять характер констатації значень величин тих або інших параметрів без аналізу впливу на них як геометричних параметрів, так і гідродинамічних особливостей потоку. Крім того, значна кількість робіт виконана із застосуванням методів CFD-моделювання без використання якісних експериментальних

© О.В. Семеняко, 2017

даних. Однак, слід зазначити, що в деяких роботах [5, 7, 8] при проведенні досліджень труб „H-типу” як поверхонь нагрівання енергетичних парових котлів, котрі працюють на кам’яному вугіллі, виявлений ефект самоочищення таких поверхонь від золових відкладень. Авторами виявлені особливості течії в поверхнях нагрівання, але аналіз її структури і механізму не проведений.

Тому, значний інтерес являє структура течії в каналах утворених теплообмінними поверхнями або їх елементами, яка дозволяє в значній мірі пояснити закономірності їх локального і середньоповерхневого теплообміну, а також згаданого ефекту самоочищення.

Мета та завдання

В роботі [9] при проведенні досліджень теплообміну та аеродинамічного опору шахових і коридорних пакетів плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням виявлено, що найбільш високими теплоаеродинамічними характеристиками володіє труба типу 4 (згідно з позначенням авторів). Представлена робота є певною мірою розвитком досліджень [9]. Тому термоанемометричні дослідження характеристик течії проведені для масштабної моделі (2,5:1) саме такого типу труби (рис. 2). Вибір масштабу моделі обумовлений розмірами датчика термоанемометра.

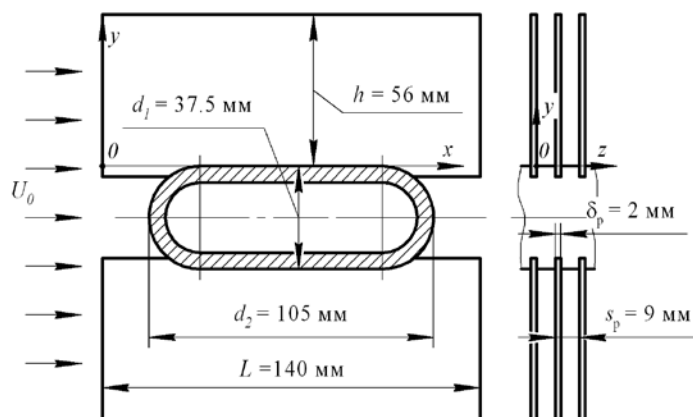
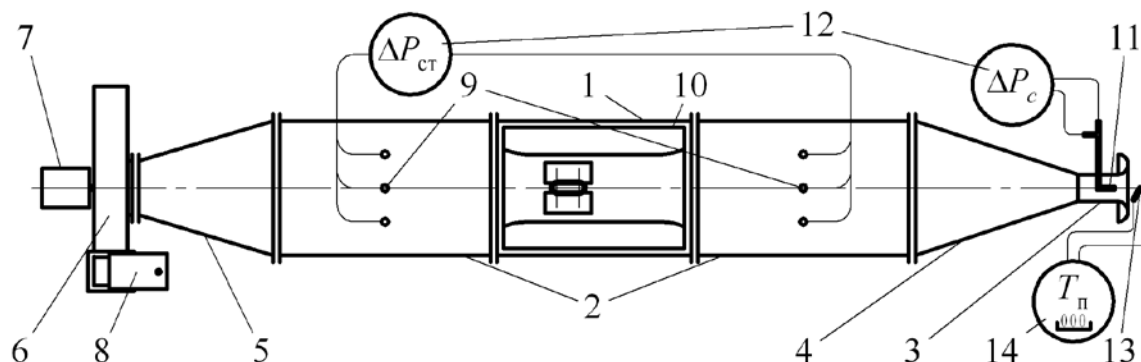


Рисунок 2 – Модель плоско-овальної труби з неповним поперечним оребренням

За мету даної роботи поставлено отримання розподілів локальних характеристик течії (осереднених в часі швидкостей і їх пульсацій) в міжреберних каналах моделі плоско-овальної труби з неповним оребренням при її поперечному омиванні потоком повітря. На основі отриманих полів даних визначити особливості течії та проаналізувати умови інтенсифікації локального і середньоповерхневого теплообміну.

Експериментальна установка та термоанемометричне обладнання

Дослідження проведені на експериментальній установці, що являє собою аеродинамічну трубу розімкнутого типу, прямокутного перетину, розміри якого склали $A \times B = 71 \times 414 \text{ мм}^2$, довжина прямого каналу – 5060 мм (рис. 3).

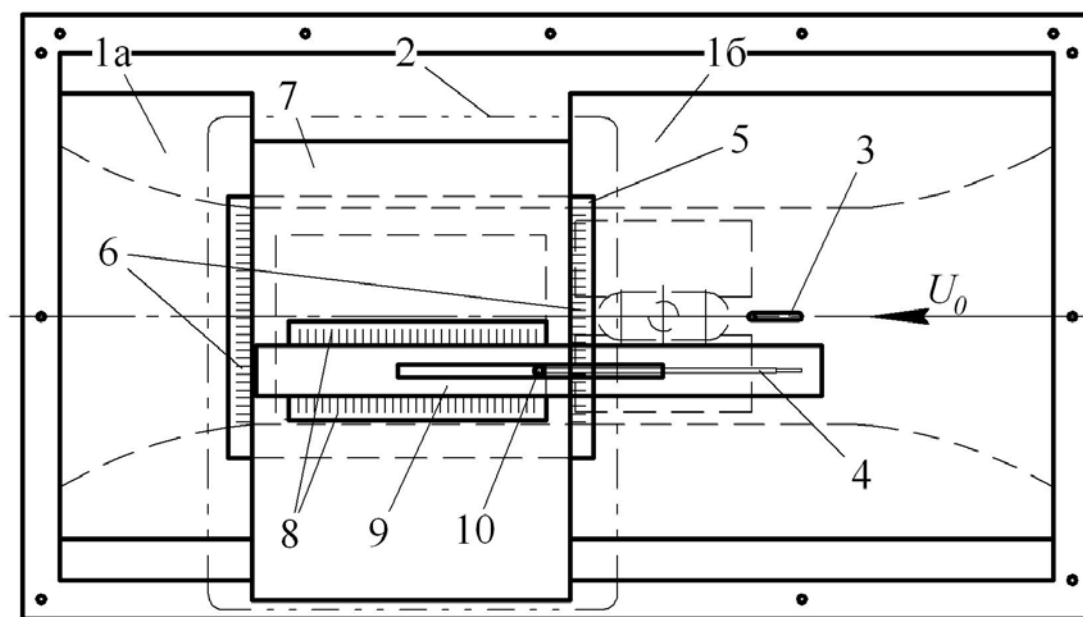


- 1 – робоча ділянка; 2 – заспокійливі ділянки; 3 – вхідне сопло; 4 – дифузор; 5 – конфузор;
 6 – вентилятор; 7 – двигун; 8 – шибер; 9 – відбори статичного тиску; 10 – прижимна рама; 11 – трубка Піто-Прандтля; 12 – мікроманометри; 13 – термопара; 14 – вимірювач сигналів термопар

Рисунок 3 – Експериментальна установка

Проточна частина (прямий канал), яка складалася з робочої ділянки і двох заспокоїливих, призначених для формування полів швидкості і вирівнювання статичного тиску, з'єднувалася з вхідним всмоктувальним соплом з діаметром $d_c = 75$ мм через перехідний дифузор. На виході з сопла встановлювалась трубка Піто-Прандтля, за допомогою якої із застосуванням мікроанометру типу ММН-2400 (5) – вимірювався динамічний напір у вихідному перетині сопла. Іншим кінцем проточна частина через перехідний конфузор приєднувалася до всмоктувального патрубку відцентрового вентилятора. Витрати повітря регулювалися шибером із гвинтовим приводом.

В каналі робочої ділянки довжиною 950 мм до бокових стінок були змонтовані дерев'яні бічні вставки з плавнопрофільованими вхідними та вихідними крайками. Така конструкція дозволяє змінювати ширину поперечного перетину каналу і забезпечує безвідривний плавний вхід у робочу ділянку. При проведенні досліджень ширина робочої ділянки складала $B_p = 170$ мм. Особливість конструкції робочої ділянки (рис. 4) полягала в тому, що верхня трубна дошка була замінена двома кришками з дерев'яноволокнистої плити (1) та системою переміщення координатника датчика (2) (СПКД). При цьому кришка (1а) розміщена вище за потоком дозволяла вводити в дослідний канал трубку Піто-Прандтля (3) для проведення тарування датчика термоанометра. За допомогою СПКД здійснювалось переміщення координатника зі встановленою в ньому державкою датчика термоанометра (4). СПКД забезпечує переміщення координатника як по ширині, так і по довжині каналу. СПКД складається з рами (5), яка прикріплюється до дерев'яних вставок. До рами пригвинчуються прижимні планки зі стандартними лінійками (6), що дозволяє фіксувати переміщення координатника по ширині каналу через 1 мм з точністю 0,5 мм. В зазор між прижимними планками та рамою заводиться алюмінієвий лист (7), що не допускає притоку повітря в робочу ділянку. До листа пригвинчуються прижимні планки (8) для закріплення рейки (9). Прижимні планки являють собою стандартні лінійки, які дозволяють фіксувати переміщення координатника по довжині каналу через 1 мм з точністю 0,5 мм. Рейка здатна переміщуватися вздовж каналу в поздовжньому напрямку. До цієї рейки за допомогою перехідника (10) прикріплюється координатник, який дає можливість переміщувати державку датчика по висоті каналу.



1а, 1б – кришки; 2 – СПКД; 3 – трубка Піто-Прандтля; 4 – державка датчика; 5 – рама СПКД;
6, 8 – прижимні планки; 7 – алюмінієвий лист; 9 – рейка; 10 – перехідник

Рисунок 4 – Схема робочої ділянки

Для проведення градування датчика через отвір в кришці (поз. 1б, рис. 4), в середину каналу робочої ділянки стенду на відстані 95 мм від вхідних крамок вводиться трубка Піто-Прандтля (поз. 3, рис. 4). Для фіксації трубки Піто-Прандтля передбачена притискна планка, яка кріпиться до дерев'яних вставок. Трубка Піто-Прандтля встановлювалась таким чином, щоб її носик знаходився в одному перетині з ниткою датчика.

Під час проведення вимірювань датчик термоанометру, закріплений в державці датчика, переміщувався по висоті h і довжині L ребра (вздовж координат x та y відповідно) по центру міжреберного каналу дослідної моделі.

Нитка датчика розміщувалася перпендикулярно потоку повітря, а також перпендикулярно поверхні ребра. Таким чином, нитка реагувала на сумарну збудженість, яка створюється при течії в каналі в поздовжньому та поперечному (нормальному відносно стінки труби, що несе оребрення) напрямках відносно U_0 . Вимірювання проводились в центральній площині міжреберного каналу, оскільки розміри державки не дозволяли наблизитися до стінки ребра ближче, ніж на 2 мм.

Для вимірювання локальних осереднених у часі швидкостей потоку та їх пульсацій використовувався комплект термоанемометричного обладнання фірми DISA-Electronics (Данія) типу 55M [10] спільно з аналогом однопроводного датчика 55P11 DISA [11], виготовленим в ІТТФ НАН України. Чутливим елементом такого датчика є вольфрамова нитка діаметром $d = 5$ мкм і довжиною $l = 1,2$ мм, що вноситься до потоку.

Основою схеми термоанемометра є вимірювальний міст Уїтстона, в одне з плечей якого підключається нитка датчика (рис. 5 а). Взаємодія потоку з чутливим елементом датчика (вольфрамовою ниткою) викликає зміну його температури і, відповідно, електричного опору. Розбаланс, що з'являється в діагоналі мосту посилюється підсилювачем зворотного зв'язку (ПЗЗ) і подається на вершину мосту. При цьому величина струму живлення, що проходить крізь нитку, змінюється таким чином, щоб поновити температуру нитки і її опір, тобто струм мосту (напряга на його вершині) функціонально зв'язані зі швидкістю потоку.

Схема термоанемометричних вимірювань представлена на рис. 5 б. Задана температура нитки підтримується з допомогою керуючого мосту 55M10. Напряга живлення E фіксується вольтметром середніх значень 55D31, що дозволяє визначити середню в часі швидкість потоку u . Пульсація напруги e , пропорційна середньоквадратичній пульсації швидкості u' , фіксується вольтметром середніх значень 55D35. Візуальне спостереження пульсацій швидкості спостерігається на екрані осцилографа С1-70.

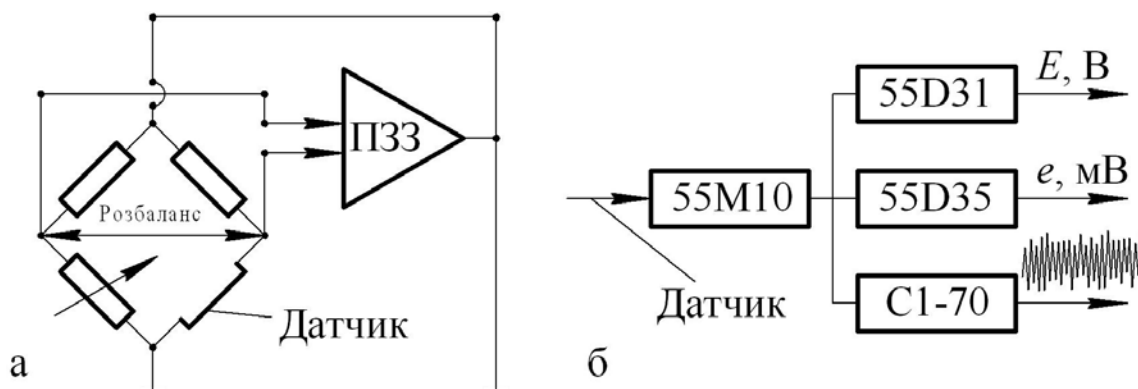


Рисунок 5 – Схема термоанемометру постійної температури (а) та схема термоанемометричних вимірювань (б)

Цифровий вольтметр 55D31 має межі вимірювання напруги 1 В і 100 В. Передня панель містить два перемикачі: напруги на виході з мосту і постійних часу. Перший дозволяє встановити межі напруги: 1, 10, 100 В. Другий дозволяє встановити в діапазоні 0,1 – 100 с 7 значень постійної часу для осереднення сигналу, що знімається з діагоналі мосту і поступає на вхід вольтметру.

Вольтметр середньоквадратичних значень 55D35 дозволяє вимірювати напругу в широкому діапазоні від 1 мВ до 300 мВ. Прилад також забезпечує вимірювання постійних часу пульсуючого сигналу в діапазоні 0,3 – 100 с.

Осцилограф С1-70 дозволяє здійснювати налаштування термоанемометричної системи і візуально спостерігати за сигналом в процесі проведення експерименту.

На підставі отриманої градуовальної характеристики датчика термоанемометра (будувалася в лінеаризованих координатах $E^2 \propto u^{0,45}$ [12]) визначалися константи градування E_0^2 і B_0 , необхідні для розрахунку швидкості та її середньоквадратичної пульсації по залежностях (1) і (2) [12]:

$$u = \left(\frac{E^2 - E_0^2}{B_0} \right)^{2,22} \quad (1)$$

де u – швидкість потоку, м/с; E – напряга, що знімається з діагоналі мосту (лінійно пов'язана з падінням напруги на нитці датчика, але посилена за рахунок мостової схеми і підсилювача зворотного

зв'язку), B ; E_0^2 – квадрат фіктивної напруги, значення якого визначається при пролонгації градууювальної характеристики до $u = 0$ м/с, B^2 ; B_0 – константа градуювання, $B^2/(м/с)^{0,45}$;

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{u} = \frac{0,444 \cdot E}{E^2 - E_0^2} \sqrt{e'^2} \quad (2)$$

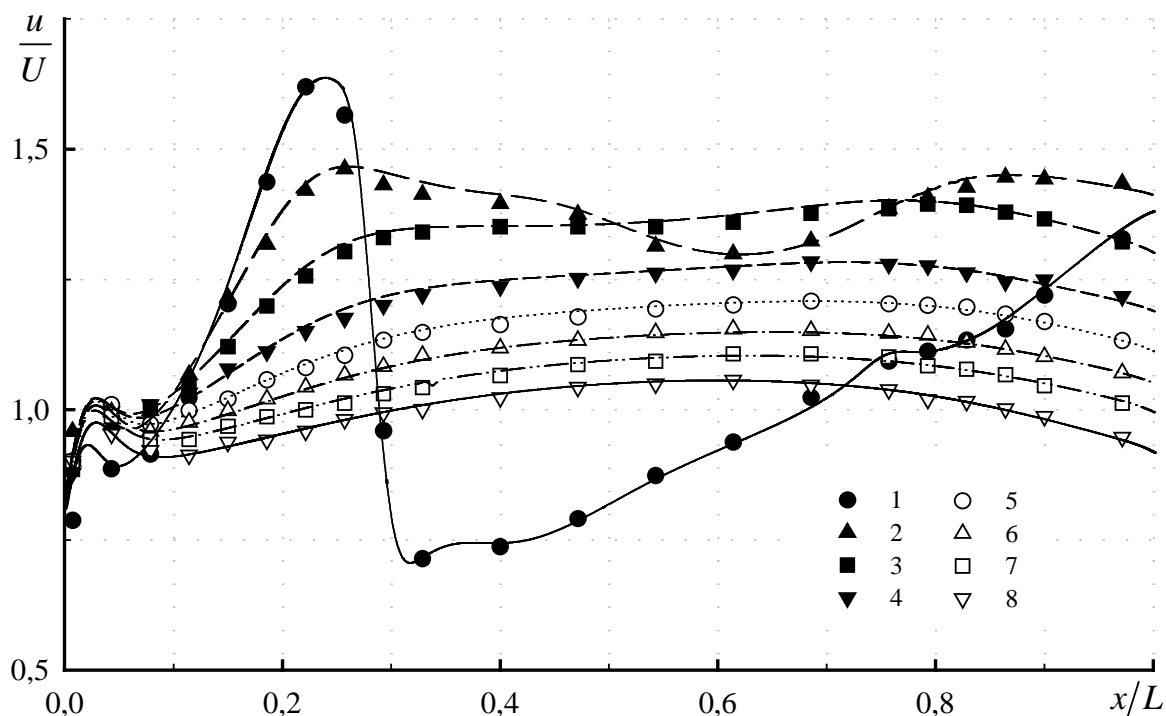
де $\sqrt{e'^2}$ – середньоквадратична пульсація напруги, мВ.

В даній роботі, з огляду на використання однопунктового датчика термоанемометра, схему розташування в міжреберному каналі та прийняту методику вимірювання, середньоквадратична пульсація позадвжньої компоненти швидкості асоціюється зі ступенем турбулентності потоку Tu .

Аналіз величин сумарних розрахункових похибок вимірювання гідродинамічних характеристик потоку (локальних осереднених у часі швидкостей та їх пульсацій) при проведенні термоанемометричних досліджень виконаний за рекомендаціями [13] показав, що похибка вимірювання локальної осередненої у часі швидкості не перевищує $\pm 2,1$ %, а її середньоквадратичної пульсації – $\pm 4,5$ %.

Результати досліджень

Термоанемометричні дослідження характеристик течії – пульсацій швидкості і ступеню турбулентності проведені в ізотермічному ($T \approx 20$ °С) потоці повітря при $Re = Ud_1/\nu \approx 50 \cdot 10^3$, що відповідає швидкості в „живому” перетині робочої ділянки $U \approx 20$ м/с. Розподіли осередненої у часі локальної швидкості потоку в центральній горизонтальній площині міжреберного каналу представлені на рис. 6.



1 – $y/h = 0,054$; 2 – $y/h = 0,13$; 3 – $y/h = 0,25$; 4 – $y/h = 0,38$;
5 – $y/h = 0,5$; 6 – $y/h = 0,63$; 7 – $y/h = 0,75$; 8 – $y/h = 0,88$

Рисунок 6 – Розподіл швидкості в міжреберному каналі плоско-овальної труби

На рис. 6 видно стрибкоподібне збільшення швидкості біля гострої вхідної крайки ребра (при $x/L < 0,03$) по всій висоті ребра. Після цього відбувається її деяке зниження (приєднання потоку) і подальше нерівномірне по висоті зростання. Поверхню ребра по його висоті можна розділити на дві

приблизно рівні частини – прикореневу $y/h < 0,5$ зі значними градієнтами швидкості і периферійну $y/h \geq 0,5$ з помірними градієнтами швидкості.

Значний градієнт швидкості в області $y/h < 0,2$, $x/L = 0,1..0,25$ пов'язаний з взаємодією потоку, що потрапляє в міжреберний простір з фронту ребра, і потоку, що потрапляє туди з вільного від ребер простору перед лобовою частиною труби, що несе оребрення. Різке падіння швидкості при $x/L = 0,25 - 0,32$ свідчить про відривання потоку від поверхонь ребра і труби з утворенням вихорових структур, що потім переміщуються вниз за потоком тим самим турбулізуючи течію у всій прикореневій області поверхні міжреберного каналу. Все вищесказане можна трактувати як утворення тривимірного вихорового джгута. Це підтверджується рис. 7 на якому представлені розподіли ступеню турбулентності в міжреберному каналі плоско-овальної труби. Крім того на рис. 7 видно збільшення ступеню турбулентності в перетині $y/h = 0,13$ при $x/L = 0,5..0,8$, що свідчить про розвиток вказаних вихорових структур як вниз за потоком, так і вздовж висоти ребра, тобто про їх тривимірність. Стрибок ступеню турбулентності $y/h = 0,054$ при $x/L = 0,85..0,9$ пов'язаний з відриванням потоку від поверхні труби, що несе оребрення в місці з'єднання її кормової частини з ребром.

При збільшенні координати у розподіли швидкості та ступеня турбулентності стають більш рівномірними і в периферійній частині ребра течія має характер подібний до течії в напіввідкритому каналі [14].

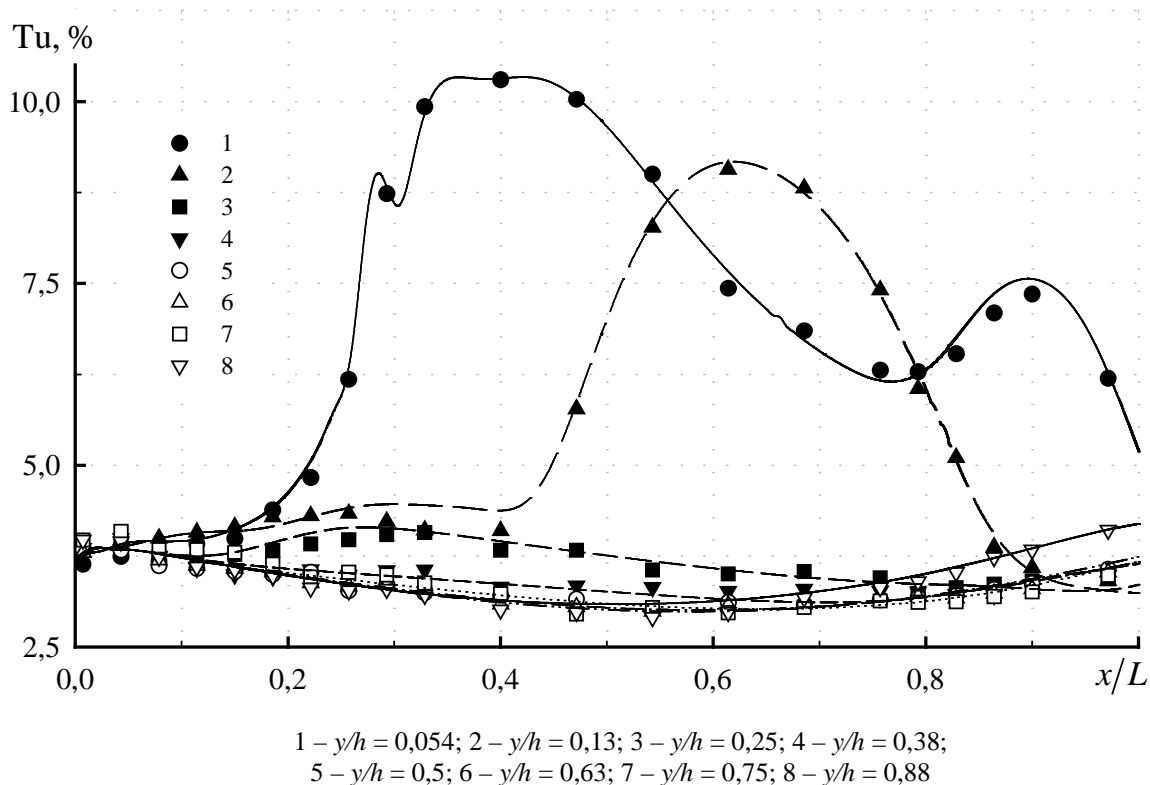


Рисунок 7 – Розподіл ступеню турбулентності в міжреберному каналі плоско-овальної труби

Вказані особливості потоку в прикореневій частині міжреберного каналу плоско-овальної труби внаслідок підвищених локальних швидкостей призводять до збільшення інтенсивності локального теплообміну. Генерація складних, доволі потужних (рис. 7) вихорових структур призводить до турбулізації потоку в прикореневій частині ребра при $x/L > 0,2$ і тим самим до інтенсифікації теплообміну по всій її поверхні.

Крім того, виявлені закономірності змін характеристик течії пояснюють виявлений авторами [5, 7] ефект самоочищення поверхонь нагрівання з труб з пелюстковим (*H-type*) оребренням.

Висновки

Проведені експериментальні термоанемометричні дослідження гідродинамічних характеристик потоку в міжреберних каналах плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням. Отримані розподіли полів осереднених у часі швидкостей і середньоквадратичних пульсацій швидкості в

центральної площині міжреберного каналу. Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки:

- течія в міжреберних каналах носить складний тривимірний відривний характер;
- за характером течії в міжреберному просторі поверхня ребра може бути уявно розділена по його висоті на дві частини;
- генерація підвищеного рівня турбулентності, пов'язана з взаємодією потоку, що потрапляє в міжреберний простір з фронту ребра і потоку, що потрапляє туди з вільного від ребер простору перед лобовою частиною труби, що несе оребрення, призводить до інтенсифікації локального теплообміну в прикореневій області поверхні ребра;
- виявлені закономірності змін характеристик течії в міжреберних каналах плоско-овальних труб дозволяють пояснити ефект самоочищення таких поверхонь нагрівання.

Список використаної літератури

1. Теплообмінна труба: пат. 25025 Україна. МПК (2006) F28F 1/12. №u200702332. заявл. 03.03.2007; опубл. 25.07.2007, Бюл. №11. 2 с.
2. Письменный Е. Н. Новые эффективные развитие поверхности теплообмена для решения задач энерго- и ресурсосбережения. *Пром. теплотехника*. 2007, т. 29, № 5. С. 7 – 16.
3. Zhangjun Wang, Zhuoxiong Zeng, Yihua Xu Study on heat transfer and resistance characteristics of h-type finned tube. *Advanced Materials Research*. 2017. Vol. 805-806. P. 1817 – 1822.
4. Heng Chen, Yungang Wang, Qinxin Zhao, Haidong Ma, Yuxin Li and Zhongya Chen Experimental investigation of heat transfer and pressure drop characteristics of h-type finned tube banks. *Energies*. 2014. Vol 7(11), P. 7094-7104. doi:10.3390/en7117094.
5. Tao Han, Chang'an Wang, Qi Cao, Wufeng Chen, Defu Che Investigation on heat transfer characteristics of the H-type finned tube in flue gas with high content of ash *The 8th International Conference on Applied Energy – ICAE2016: Energy Procedia* 105 (2017). P. 4680 – 4684.
6. Мигай В.К., Быстров П.Г., Федотов В.В. Теплообмен в поперечно-обтекаемых пучках труб с оребрением лепесткового типа. *Тяжелое машиностроение*. 1992. № 7. С. 8 – 10.
7. X.B.Zhao, G.H.Tang, X.W.Ma, Y.Jin, W.Q.Tao Numerical investigation of heat transfer and erosion characteristics for H-type finned oval tube with longitudinal vortex generators and dimples. *Applied Energy*, Vol. 127, P. 93 – 104. 15 August 2014.
8. Lei Ma, Fei Li, Jiayou Liu, Zhimin Li, Fengzhong Sun Experimental research on H-type elliptical finned tubes in low temperature boiler gas flue. doi:10.5023/IJSSST.a.17.09.01.
9. Дослідження процесів теплообміну та аеродинаміки в нових типах оребрених поверхонь для теплообмінних апаратів енергетичного і промислового призначення. Звіт з НДР д/б № 2016-п. ДР № 0107U002087. Кер. Письменний Є. М. НТУУ «КПІ», 2009. 159 с.
10. *DISA scientific research equipment: complete catalog*, Dyva Bogtryk-offset, Denmark, 1972.
11. *DISA: probe catalog*, Dyva Bogtryk-offset, Denmark, 1982.
12. Дыбан Е. П., Эпик Э. Я. Теплообмен и гидродинамика турбулизованных потоков. Киев: Наукова думка, 1985. 293 с.
13. Касандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. Москва: Наука, 1970. 104 с.
14. Баранюк О.В. Теплообмін та аеродинаміка плоских поверхонь з пластинчасто-розрізним оребренням. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06 / НТУУ „КПІ”. Київ, 2009. 183 с.

A. Semenyako, TF, ORCID 0000-0002-9097-1358
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

THERMOANEMOMETRIC MEASUREMENTS OF FLOW CHARACTERISTICS IN INTERFINS CHANNELS OF FLAT-OVAL TUBES

Experimental thermoanemometric research of flow characteristics – time averaged velocities u and its mean square pulsations u' have been carried out in the interfin channels of flat-oval tube with incomplete fins model in transverse flow of air. Description of the experimental equipment and research methodology is presented. The distribution of local time averaged velocity fields and mean square velocity pulsations in the central plane of

the interfin channel are obtained. An analysis of the conditions for the intensification of local heat transfer on the surfaces of flat-oval tubes with incomplete fins is carried out. It was revealed that the flow pattern in the interfin channel has a complex three-dimensional detachment. It is shown that by the flow pattern in the interfin space, the surface of the fin can be imaginary divided by its height into two parts. Three types of separation on the surface of the fins have been identified - near the sharp input edge, at the interaction of cross flows and in places docking surfaces of the fins and the curvilinear part of the tube. It is shown that the generation of an increased level of turbulence associated with the interaction of the flow entering the interfin space from the edge of the fins and the flow entering it from the space free of fins in the frontal part of the tube leads to the intensification of local heat transfer in the root area of the fin. The presence of regions with increased intensity of local heat exchange is associated with the hydrodynamic features of the flow - the generation of a powerful vortex wisp and its development along the root area of the fin. The revealed patterns of changes in flow characteristics in the interfin channels of flat-oval tubes can explain the effect of self-cleaning of such heat transfer surfaces.

Keywords: flat-oval tube, fin, channel, flow, thermoanemometry, velocity, pulsation

References

1. Ye. Pysmennyy *et al.*, "Heat transfer tube", UA Patent 25025, July 25, 2007.
2. Ye. Pysmennyy, "New effective extended heat transfer surfaces for solving energy and resource saving problems", *Industrial heat engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 7 – 16, 2007.
3. Zhangjun Wang, Zhuoxiong Zeng, Yihua Xu "Study on heat transfer and resistance characteristics of h-type finned tube", *Advanced Materials Research*, vol. 805-806, pp. 1817 – 1822, 2017.
4. Heng Chen, Yungang Wang, Qinxin Zhao, Haidong Ma, Yuxin Li and Zhongya Chen "Experimental investigation of heat transfer and pressure drop characteristics of h-type finned tube banks", *Energies*, vol. 7(11), pp. 7094-7104, 2014. doi:10.3390/en7117094.
5. Tao Han, Chang'an Wang, Qi Cao, Wufeng Chen, Defu Che Investigation on heat transfer characteristics of the H-type finned tube in flue gas with high content of ash *The 8th International Conference on Applied Energy – ICAE2016: Energy Procedia* 105 (2017). pp. 4680 – 4684.
6. V. Migaj, P. Bystrov, V. Fedotov, "Heat transfer in transversely streamlined tube bundles with petal type fins [Теплообмен в поперечно-обтекаемых пучках труб с ребрением лепестковомого типа]". *Heavy mechanical engineering [Tyazheloe mashinostroenie]*, no. 7, pp. 8 – 10, 1992, [in Russian].
7. X.B.Zhao, G.H.Tang, X.W.Ma, Y.Jin, W.Q.Tao "Numerical investigation of heat transfer and erosion characteristics for H-type finned oval tube with longitudinal vortex generators and dimples", *Applied Energy*, vol. 127, P. 93 – 104, 15 Aug. 2014.
8. Lei Ma, Fei Li, Jiayou Liu, Zhimin Li, Fengzhong Sun "Experimental research on H-type elliptical finned tubes in low temperature boiler gas flue". doi:10.5023/IJSSST.a.17.09.01.
9. Ye. Pysmennyy *et al.*, "The researches of processes of heat transfer and aerodynamics in new types of finning surfaces for heat transfer devices of power and industrial application", NTUU "KPI", Kyiv, Ukraine, Rep. 0107U002087, 2009.
10. *DISA scientific research equipment: complete catalog*, Dyva Bogtryk-offset, Denmark, 1972.
11. *DISA: probe catalog*, Dyva Bogtryk-offset, Denmark, 1982.
12. Ye. Dyban and E. Epik, *Heat transfer and hydrodynamics of turbulized flows*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 1985.
13. O. Kasandrova and V. Lebedev, *Processing of observation results*. Moscow, USSR: Nauka, 1970.
14. O. Baranyuk, "Heat Transfer and Aerodynamics of Flat Surfaces with Slit Plate Fins" Ph.D. dissertation, Heat-and-Power Eng. Dept., NTUU "KPI", Kyiv, Ukraine, 2009.

Надійшла 07.12.2017
Received 07.12.2017