

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

СЕМЕНЯКО ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 536.24:533.6.011

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ В ТЕПЛООБМІННИХ
ПОВЕРХНЯХ З ПЛОСКО-ОВАЛЬНИХ ТРУБ З ПОПЕРЕЧНИМ
ОРЕБРЕННЯМ**

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі атомних електричних станцій і інженерної теплофізики Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Письменний Євген Миколайович,
Національний технічний університет України
„Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського”, декан теплоенергетичного факультету,
професор кафедри атомних електричних станцій і
інженерної теплофізики

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Клименко Віктор Миколайович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
головний науковий співробітник

кандидат технічних наук
Згурський Володимир Олександрович,
Інститут газу НАН України,
старший науковий співробітник

Захист дисертації відбудеться 25 вересня 2018 року о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.09 в Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, Київ, просп. Перемоги, 37, корпус 5, аудиторія 307.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий „___” серпня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В. І. Коньшин

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогодні важливою економічною задачею є раціональне та ефективне використання енергоресурсів в різних галузях промисловості (енергетиці, нафтопереробній, хімічній, харчовій тощо). Основна частина теплової енергії передається в різноманітних теплообмінних пристроях, значну частку яких складають рекуперативні теплообмінні апарати широкого призначення (теплоутилізатори, підігрівачі або охолоджувачі технологічних рідин, повітряні конденсатори і градирні та ін.). В умовах постійного підвищення вартості матеріальних та енергетичних ресурсів відповідно збільшується важливість і актуальність проблеми вдосконалення теплообмінних апаратів – зменшення їх розмірів і маси та зниження витрат на власні потреби при їх експлуатації. Основним шляхом покращення масогабаритних і експлуатаційних характеристик енергоустановок є застосування в теплообмінних апаратах інтенсифікованих поверхонь теплообміну.

На даний час в якості елементів рекуперативних теплообмінних апаратів типу „газ-рідина” широко використовуються круглоребристі труби. Перехід до використання профільованих оребрених труб пов'язаний з прагненням зменшення загального аеродинамічного опору теплообмінного апарату. За рахунок підвищення швидкості теплоносія для теплообмінних поверхонь з ребристих труб зручнообтічної форми зростає інтенсивність теплообміну, що призводить в цілому до підвищення енергетичної ефективності теплообмінного устаткування.

Досягнення високих теплоаеродинамічних характеристик теплообмінного обладнання в значній мірі пов'язано з оптимізацією поверхонь нагрівання, яка не можлива без глибокого вивчення закономірностей процесів переносу і базується на дослідженні локальних характеристик та дозволяє виявити їх фізичні особливості та механізми інтенсифікації, що актуально з огляду на надійність роботи теплообмінного обладнання в умовах підвищених температур, теплових потоків, вологості тощо. Крім того володіння інформацією про розподіл локальних характеристик дозволяє визначати шляхи подальшої інтенсифікації процесів тепло- і масопереносу.

Таким чином, вивчення локальних характеристик процесів переносу в поверхнях з плоско-овальних оребрених труб та визначення оптимальних геометричних характеристик оребрення є важливою науково-практичною задачею, актуальною як в науковому, так і в практичному планах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки «Енергетика і енергоефективність» і тісно пов'язана з дослідженням та розробкою нових високоефективних теплообмінних поверхонь на основі плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням. Окремі частини дисертаційної роботи входили до складу науково-дослідницьких програм кафедри атомних електричних станцій і інженерної теплофізики Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, прикладних держбюджетних науково-дослідних робіт № 2016-п „Дослідження процесів теплообміну та аеродинаміки в нових типах оребрених поверхонь для теплообмінних апаратів

енергетичного і промислового призначення” (номер державної реєстрації 0107U002087) і № 2343-п „Створення наукових і технологічних основ для розробки перспективних вискоефективних оребрених поверхонь теплообміну” (номер державної реєстрації 0110U001318), які виконувались за тематичним планом науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є створення науково обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення теплоаеродинамічної ефективності і зниження металомісткості рекуперативних теплообмінних апаратів шляхом дослідження середніх і локальних характеристик процесів переносу в поверхнях нагріву на основі плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі основні *задачі*:

1. Провести експериментальні дослідження середньоповерхневого конвективного теплообміну та аеродинамічного опору плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням.

2. Дослідити вплив геометричних параметрів поперечних плоских ребер на інтенсивність теплообміну та аеродинамічний опір плоско-овальних труб в широкому діапазоні режимних параметрів.

3. Отримати узагальнюючі залежності для розрахунку інтенсивності теплообміну та аеродинамічного опору однорядних теплообмінних систем з плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням.

4. Визначити характеристики та структуру течії в міжреберних каналах плоско-овальних труб на основі вимірювання статичних тисків та методами поверхневої візуалізації потоку і термоанемометрії.

5. Отримати нові знання та поглибити фізичні уявлення щодо механізмів переносу теплоти та імпульсу при вимушеному обтіканні плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням за допомогою CFD-моделювання.

6. Узагальнити результати досліджень у вигляді фізичної моделі процесів течії та теплообміну на поверхні плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням.

7. На основі результатів проведених досліджень розробити методіку розрахунку та рекомендації щодо вибору оптимальних характеристик оребрення плоско-овальних труб.

Об'єкт дослідження – процеси переносу теплоти та імпульсу при вимушеному поперечному обтіканні плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням газовим потоком.

Предмет дослідження – вплив конструктивних та режимних параметрів на закономірності конвективного теплообміну, його локальні характеристики, аеродинаміку та структуру течії при вимушеному обтіканні плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням.

Методи дослідження. Визначення коефіцієнтів конвективного теплообміну за результатами експериментальних вимірювань розподілів температур та теплових потоків на поверхнях плоско-овальної труби та оребрення. Визначення аеродинамічного опору плоско-овальних оребрених труб за результатами вимірювання перепадів тисків. Визначення характеристик та структури течії, ступеня турбулентності в міжреберному каналі та поблизу труби методом

термоанемометрії. Вивчення особливостей течії на стінках труби та ребра методом поверхневої візуалізації за допомогою саже-газової суспензії та за результатами вимірювання полів статичних тисків. Дослідження теплогідродинамічних процесів на поверхні плоско-овальної труби з неповним поперечним оребренням методами обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD – моделювання).

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше виконані комплексні дослідження фізичного механізму процесів переносу теплоти та імпульсу при вимушеному обтіканні плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням.

2. Вперше вивчені характеристики, закономірності та структура течії в міжреберних каналах плоско-овальних оребрених труб.

3. Вперше експериментально визначені закономірності розподілу локальних характеристик інтенсивності теплообміну на поверхнях поперечних ребер плоско-овальних труб.

4. Вперше вивчено характер впливу висоти поперечних ребер при зміні видовження профілю плоско-овальної труби на інтенсивність теплообміну та аеродинамічний опір.

5. Запропоновані узагальнюючі співвідношення для розрахунку інтенсивності теплообміну та аеродинамічного опору однорядних теплообмінних систем з плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням, які враховують зміну відносної висоти ребра в широкому діапазоні її значень.

6. Вперше розроблена фізична модель течії та теплообміну на поверхні ребер плоско-овальної труби.

7. Вперше запропоновано методику визначення оптимальних геометричних параметрів поперечних ребер плоско-овальних труб в залежності від режимних параметрів роботи теплообмінного апарату.

Матеріал дисертації розширює та поглиблює наукові знання про теплові та аеродинамічні процеси в поверхнях нагріву, виконаних з плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням.

Практичні значення результатів роботи. На основі виконаних досліджень розроблені інженерні методики розрахунку інтенсивності теплообміну та аеродинамічного опору однорядних теплообмінних систем з плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням, які враховують зміну відносної висоти ребра в широкому діапазоні її значень.

Запропоновані нові методики визначення оптимальних геометричних параметрів поперечних ребер плоско-овальних труб в залежності від режимних параметрів роботи теплообмінного апарату, які дозволяють знизити металомісткість та аеродинамічний опір такої системи при високих значеннях інтенсивності теплообміну.

Матеріали дисертаційної роботи застосовуються в навчальному процесі теплоенергетичного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського при підготовці студентів спеціальності 144 Теплоенергетика, а також магістрантів за спеціалізацією «Теплофізика».

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, приведені у дисертаційній роботі, отримані особисто автором, у тому числі: результати експериментальних

досліджень, узагальнені залежності для розрахунку аеродинамічного опору та коефіцієнтів теплообміну поверхонь нагріву, виконаних з плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням, результати CFD-моделювання динаміки течії та теплообміну на поверхнях плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням, розкриття механізму інтенсифікації тепломасопереносу, нові інженерні методики розрахунків теплообміну і аеродинамічного опору плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням для рекуперативних теплообмінних апаратів широкого призначення. В опублікованих у співавторстві роботах здобувачеві належать: основні результати досліджень теплообміну та аеродинамічного опору плоско-овальних оребрених труб, характеристик, структури та візуалізації течії на поверхнях ребер плоско-овальних труб, проведення експериментальних досліджень, обробка та узагальнення експериментальних даних, аналіз отриманих результатів, розробка методик теплових і аеродинамічних розрахунків, оптимізація геометричних характеристик оребрення плоско-овальних труб.

Апробація результатів дисертації. Результати та основні положення роботи доповідались та обговорювались на: XVII Школі-семінарі молодих учених і спеціалістів під керівництвом академіка РАН А. І. Леонтьєва «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях» (м. Жуковський, Росія, 25 – 29.05.2009 р.); V російській національній конференції по теплообміну. (м. Москва, Росія, 25 – 29.10.2010 р.); XVIII Школі-семінарі молодих учених і спеціалістів під керівництвом академіка РАН А. І. Леонтьєва «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях» (м. Звенигород, Росія, 23 – 27.10.2011 р.); VI Congreso internacional de ingeniería electromecánica y de sistemas (México, noviembre 2011); Міжнародній науково-практичній школі-конференції „Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики” (Україна, Крим, м. Алушта, 19 – 25.09.2011 р.); X Міжнародній науково-практичній конференції аспірантів, магістрантів і студентів „Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики” (м. Київ, 17 – 20.04.2012 р.); Міжнародній науково-практичній школі-конференції „Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики” (Україна, Крим, м. Алушта, 13 – 23.09.2012 р.); XIX Школі-семінарі молодих учених і спеціалістів під керівництвом академіка РАН А. І. Леонтьєва «Проблемы газодинамики и тепломассообмена энергетических установках» (м. Орехово-Зуєво, Росія, 20 – 24.05.2013 р.); XII Міжнародній науково-практичній конференції аспірантів, магістрантів і студентів „Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики” (м. Київ, 22 – 25.04.2014 р.); XIV Міжнародній науково-практичній конференції аспірантів, магістрантів і студентів „Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики” (м. Київ, 18 – 21.04.2016 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 31 наукову працю, у тому числі 15 статей у наукових фахових виданнях (з них 6 статей у виданнях іноземних держав; 9 статей у наукових фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 2 патенти України на корисну модель, 11 тез доповідей та матеріалів конференцій, 3 статті в інших виданнях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел з 159 найменувань та 2 додатків. Загальний обсяг роботи складає 226 сторінок, з них 89 рисунків та 16 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, викладено наукову новизну і практичну цінність, представлено дані з апробації результатів роботи і особистий внесок здобувача у виконану роботу.

У **першому розділі** приведений критичний огляд теоретичних, експериментальних та розрахункових робіт, пов'язаних з використанням теплообмінних поверхонь з поперечно-оребrenих труб. Проаналізовано сучасний стан проблеми інтенсифікації теплообміну в трубчастих поперечно-оребrenих поверхнях теплообміну, шляхи підвищення їх теплоаеродинамічної ефективності та представлені в літературі співвідношення для розрахунків середньоповерхневих коефіцієнтів теплообміну і аеродинамічного опору таких поверхонь, а також вплив типів труб та їх компоновальних параметрів на теплоаеродинамічні характеристики.

В попередніх роботах (В. К. Мигай, Є. М. Письменний) показано, що одним з дієвих засобів підвищення теплоаеродинамічної ефективності круглоребrenих поверхонь теплообміну є видалення частин ребер (в лобовій і кормовій областях), які не приймають участь в інтенсивному теплообміні. Крім того, у великій кількості робіт (В. М. Антуф'єв, А. А. Жукаускас, Т. Ота, В. М. Кейс, Є. М. Письменний, А. А. Hasan) показано, що перехід від круглої форми поперечного перетину труб до зручнообтічної дозволяє збільшити теплоаеродинамічну ефективність поверхонь теплообміну в 1,5 – 2 рази. Зазначені шляхи підвищення теплоаеродинамічної ефективності поєднуються у розроблених в 2007 р. в НТУУ „КПІ” теплообмінних поверхнях у вигляді плоско-овальних труб з неповним поперечним оребrenням. Дослідження характеристик таких поверхонь (Є. М. Письменний, П. І. Багрій, О. М. Терех) показали, що вони мають низькі значення аеродинамічного опору (в порівнянні з аналогічними за геометрією ребrenистими круглими, овальними та біметалевими трубами). При цьому інтенсивність конвективного теплообміну поперечно-оребrenих плоско-овальних труб перевищує аналоги.

Дотепер відсутні системні дослідження локальних теплоаеродинамічних характеристик процесів переносу теплоти та імпульсу в поверхнях теплообміну, виготовлених з плоско-овальних труб з неповним поперечним оребrenням, котрі в значній мірі дозволяють пояснити високу інтенсивність середньоповерхневого теплообміну таких труб при відносно малому їх аеродинамічному опорі.

Завершує розділ постановка задач дослідження, що впливають з аналізу сучасного стану проблеми.

У **другому розділі** приведено: опис експериментальної установки та робочих ділянок, геометричні характеристики досліджених моделей оребrenих плоско-овальних труб, методики досліджень та обробки даних з середньоповерхневого та локального теплообміну, аеродинамічного опору, візуалізації течії, розподілів статичних тисків, термоанемометричних вимірювань, CFD-моделювання.

У роботі був застосований комплексний підхід до моделювання процесів переносу, який передбачав проведення як фізичного, так і CFD-моделювання, що дозволило отримати за відносно короткий термін великий масив даних.

Дослідження проведені в діапазоні чисел Рейнольдса $Re = (10 - 90) \cdot 10^3$ для 11 моделей труб (рис. 1), виконаних в масштабі 2,5:1 ($d_1 = 37,5$ мм) та 2:1 ($d_1 = 30$ мм) відносно натурних труб. Моделі відрізнялись типорозмірами плоско-овальних основ ($d_2/d_1 = 2,8$ і $d_2/d_1 = 2,0$) та відносною висотою ($h/d_2 = 0,105 \dots 0,737$) ребер постійної товщини $\delta_p = 2$ мм, розміщеними з постійним кроком $s_p = 9$ мм. Необхідність використання масштабних моделей обумовлена обраними методиками досліджень та розмірами засобів вимірювання.

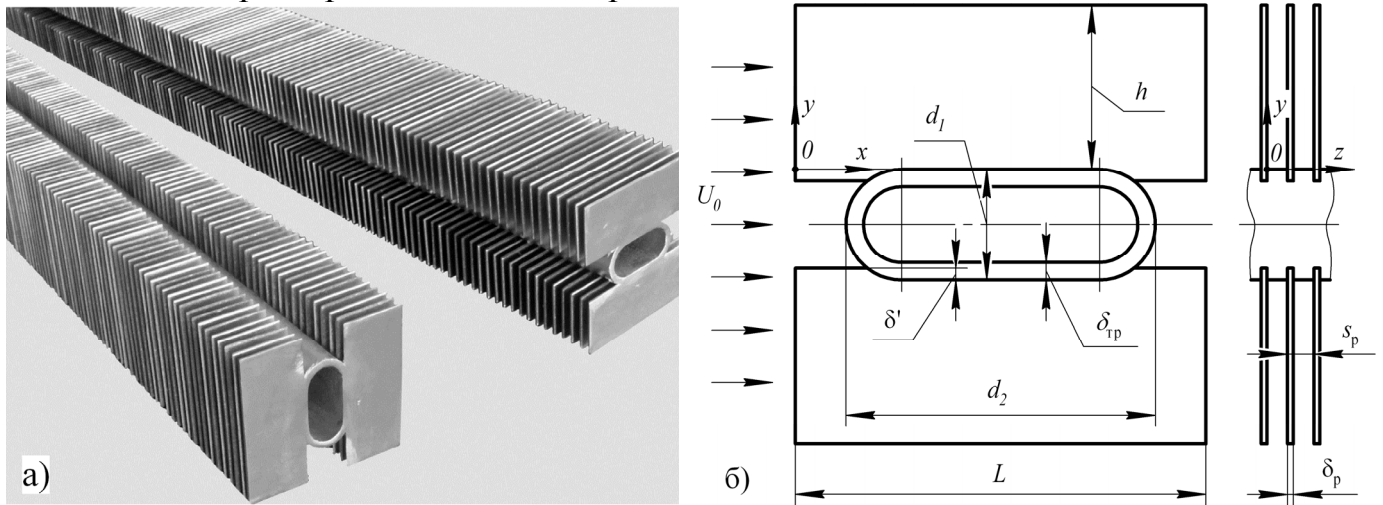


Рис. 1. Загальний вигляд (а) та геометричні характеристики (б) досліджених труб

Експериментальні дослідження проведені на установці, що представляє собою аеродинамічну трубу розімкненого типу прямокутного перетину 71×414 мм² та довжиною прямого проточного каналу 5060 мм. Робоча ділянка, всередині якої розміщувалась дослідна труба, мала довжину 950 мм. Ширина робочої ділянки регулювалась за допомогою бічних вставок з заокругленими краями.

При дослідженні середньповерхневого та локального теплообміну використовувались сталеві з паяними ребрами та мідні з приварними ребрами труби-калориметри, з розміщеними всередині них омичними електронагрівачами. Температурне поле центрального ребра і стінки труби, що несе ребрення, вимірювалось за допомогою 21-ої зачеканеної свинцем мідь-константанової термопари. Середні конвективні $\bar{\alpha}$ і приведені $\alpha_{пр}$ коефіцієнти теплообміну визначались у відповідності з залежностями:

$$\bar{\alpha} = \frac{Q}{H(\bar{T} - T_n)}; \quad (1)$$

$$\alpha_{пр} = \frac{Q}{H(\bar{T}_{ст} - T_n)}. \quad (2)$$

За визначеними величинами $\bar{\alpha}$ і $\alpha_{пр}$ розраховувалась ефективність ребра

$$\alpha_{\text{пр}} = \bar{\alpha} \left(\frac{H_p}{H} \cdot E + \frac{H'_{\text{гл}}}{H} \right) \Rightarrow E = \left(\frac{\alpha_{\text{пр}}}{\bar{\alpha}} - \frac{H'_{\text{гл}}}{H} \right) \cdot \frac{H}{H_p}. \quad (3)$$

При дослідженні локального теплообміну на ребрі, протилежному центральному, навпроти спаїв термопар розміщувався перетворювач (датчик) теплового потоку. При цьому локальні значення коефіцієнтів конвективного теплообміну визначались за співвідношенням

$$\alpha_i = \frac{q_i}{(T_i - T_n)}. \quad (4)$$

Аеродинамічний опір досліджених моделей плоско-овальних труб визначався в умовах ізотермічної течії при температурі повітря $T_n = 290 \dots 300 \text{ K}$. Втрати тиску знаходились за різницею статичних тисків до і після моделі з урахуванням втрат на тертя в проточній частині стенда.

Результати обробки експериментальних даних представлені у вигляді чисел подібності Nu , Eu , Re , в яких за визначальний розмір прийнятий поперечний діаметр труби d_1 , в якості визначальної – температура повітря T_n перед моделями, а за характерну приймалась швидкість у захарашеному перетині робочої ділянки.

Для вимірювання розподілу тиску вздовж периметра плоско-овальної труби в стінці центрального міжреберного каналу та на поверхні центрального ребра була виконана система отворів діаметром 0,5 мм, з'єднаних з диференційним манометром. Результати вимірювань представлені у вигляді безрозмірного коефіцієнта тиску

$$c_{p_i} = \frac{P_i - P_0}{\rho_n U_0^2 / 2}. \quad (5)$$

Візуалізація течії здійснювалась методом поверхневої індикації потоку за допомогою саже-гасової суспензії на моделі частково оребреної плоско-овальної труби та на моделі повністю оребреної плоско-овальної труби з ідентичними висотою, довжиною, товщиною та кроком ребер. Отримані картини розподілу частинок сажі на попередньо пофарбованих білою нітромаллю поверхнях ребер фотографувались.

Для вимірювання локальних осереднених у часі швидкостей потоку та їх пульсацій використовувався комплект термоанемометричного обладнання фірми DISA-Electronics (Данія) типу 55M спільно з аналогом однопіткового датчика 55P11 DISA. Чутливим елементом такого датчика є тонка вольфрамова нитка діаметром $d = 5 \text{ мкм}$ і довжиною $l = 1,2 \text{ мм}$, що вноситься до потоку. Під час проведення вимірювань датчик термоанемометру, закріплений в державці датчика, переміщувався по висоті h і довжині L ребра (вздовж координат x та y відповідно до рис. 1) по центру міжреберного каналу дослідної моделі. Нитка датчика розміщувалась перпендикулярно потоку повітря, а також перпендикулярно поверхні ребра. Таким чином, нитка реагувала на сумарну збудженість, яка створюється при течії в каналі в повздовжньому та поперечному (нормальному відносно стінки труби, що несе оребрення) напрямках відносно U_0 .

Перед проведенням термоанемометричних вимірювань здійснювалось градування датчика термоанемометра за допомогою трубки Піто-Прандтля,

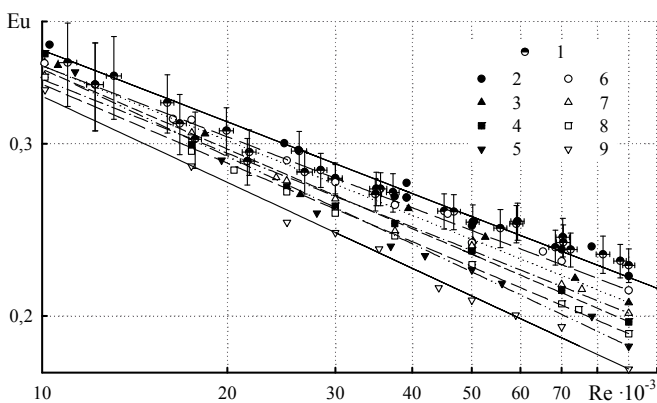
встановленої поряд з ниткою датчика в одному перетині робочої ділянки. На підставі градууювальної характеристики визначались константи градуювання E_0^2 і B_0 , необхідні для розрахунку швидкості та її середньоквадратичної пульсації за безпосередньо вимірюваними електричними сигналами за залежностями:

$$u = \left(\frac{E_e^2 - E_0^2}{B_0} \right)^{2,22}; \quad (6)$$

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{u} = \frac{0,444 \cdot E_e}{E_e^2 - E_0^2} \sqrt{e'^2}. \quad (7)$$

Використана система вимірювань та методика обробки експериментальних даних дозволяли визначати числа Нуссельта з похибкою (2,8 – 3,5) %, Ейлера – (4 – 10,4) %, Рейнольдса – (2,3 – 4) %, локальний коефіцієнт теплообміну – 4,12 %, локальну швидкість – 2,1 %, пульсацію швидкості – 4,5 %.

CFD-моделювання процесів переносу теплоти та імпульсу на поверхні елемента плоско-овальної труби, обмеженого кроком ребер, стінкою каналу аеродинамічної труби і віссю симетрії моделі, здійснювалось на основі вирішення системи рівнянь руху та енергії в формі Рейнольдса. Для замикання системи використовувалась $k-\omega$ – модель турбулентності Ментера. На вході в розрахункову область задавались рівномірні профілі осередненої швидкості і температури, на виході – умови «продовження вирішення», на внутрішній поверхні труб – умова $q = const$. Теплофізичні властивості повітря задавались у вигляді поліноміальних функцій температури. Турбулентне число Прандтля приймалось рівним $Pr_t = 0,85$. Вирішення системи базових і модельних рівнянь засновувалось на неявному кінцево-об'ємному підході з використанням процедури корекції тиску SIMPLE. При формуванні нерівномірної структурованої розрахункової сітки параметр безрозмірної відстані до стінки в середньому становив $y^+ = 3,57$.



1 – експеримент; 2 – 5 – CFD-моделювання, $d_2/d_1 = 2,8$, $h/d_2 = 0,533; 0,39; 0,248; 0,105$;

6 – 9 – CFD-моделювання, $d_2/d_1 = 2,0$, $h/d_2 = 0,737; 0,539; 0,342; 0,145$ відповідно

Рис. 2. Аеродинамічний опір досліджених моделей

У третьому розділі представлені результати дослідження аеродинамічного опору ребрених плоско-овальних труб та структури течії в міжреберних каналах.

За результатами експериментального дослідження аеродинамічного опору проведена верифікація методики CFD-моделювання (рис. 2). Отримані дані свідчать про доцільність узагальнення результатів степеневу залежністю виду

$$Eu = C_a Re^{-n}. \quad (8)$$

Результати дослідження аеродинамічного опору моделей плоско-овальних труб з неповним

поперечним орбренням (рис. 2) свідчать про зниження аеродинамічного опору при фіксованій відстані від крайки ребра до стінки каналу B_1 та зменшенні відносного видовження профілю труби, що несе орбрення d_2/d_1 , а також при зменшенні висоти ребер h при фіксованих значеннях d_2/d_1 та B_1 .

Математична обробка показала, що розшарування даних на рис. 2 відбувається в залежності від значення приведеної поверхні H/F спільно з величиною відношення висоти ребра до повздовжнього розміру труби, що несе орбрення h/d_2 . В результаті узагальнення отримані емпіричні залежності для коефіцієнта C_a та показника степені n від комплексу $(H/F)/(h/d_2)$ в (8) і узагальнююче рівняння подібності для розрахунку аеродинамічного опору

$$Eu = 6,8 \left(\frac{H}{F} \frac{h}{d_2} \right)^{-0,24} Re^{-0,332 \left(\frac{H}{F} \frac{h}{d_2} \right)^{-0,108}}, \quad (9)$$

яке описує наведені на рис. 2 результати з похибкою, що не перевищує $\pm 8\%$.

При проведенні візуалізації течії виявлено, що в дослідженому діапазоні чисел Рейнольдса картини течії носять якісно подібний характер. Чуттєвість використаного методу візуалізації течії залежить від таких факторів як: розмір частинок сажі, кількість нанесеної саже-газової суміші, її концентрація, швидкість газового потоку та час перебування моделі з нанесеною на її поверхню сумішшю в каналі аеродинамічної труби. Тому з отриманого масиву фотографій були відібрані найбільш чіткі та якісні, що показані нижче.

Картина течії на поверхні ребра повністю орбреної плоско-овальної труби (рис. 3) може бути умовно розділена по висоті ребра на дві приблизно рівні частини:

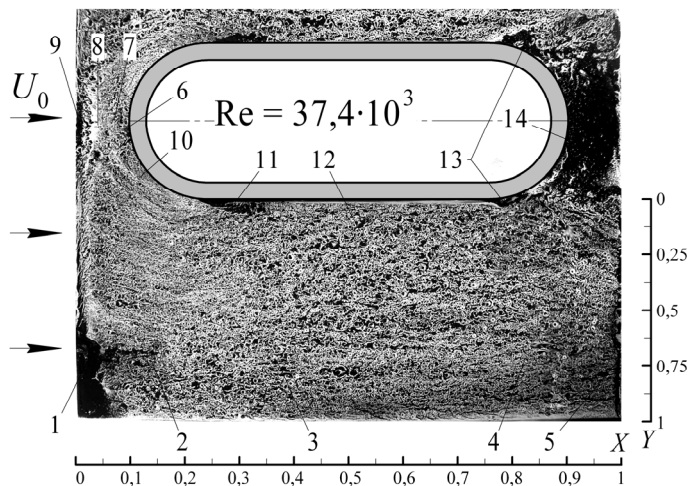


Рис. 3. Візуалізація течії на поверхні ребра повністю орбреної плоско-овальної труби

периферійну і прилеглу до стінки труби, що несе орбрення. У периферійних частинах ребра простежуються п'ять характерних областей. Область 1 представляє собою темну витягнуту вздовж крайки ребра смугу, яка свідчить про утворення відриву потоку при її обтіканні.

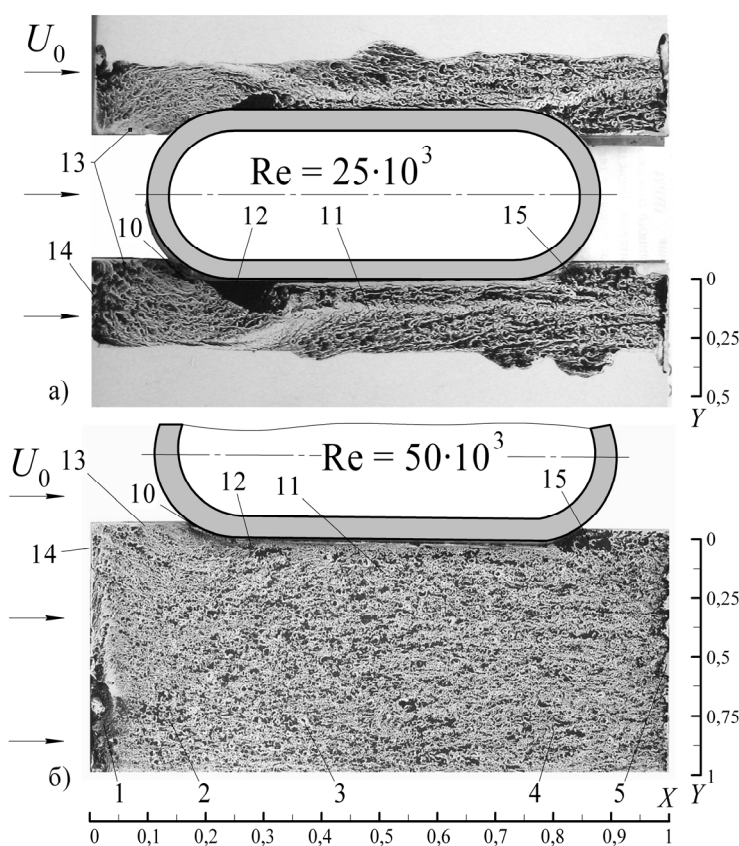
Велика кількість сажі біля кута ребра пов'язана з наявністю градієнта тиску вздовж передньої його крайки. За областю відриву 1 розташовується область 2, для якої характерна дрібномасштабна вихорова структура, що свідчить про утворення при $Tu_\infty > 0$

псевдоламінарного пограничного шару. За областю 2 розвивається область 3 ламінарно-турбулентного переходу. Область 4 являє собою область розвитку турбулентного пограничного шару на поверхні ребра. Тут спостерігається укрупнення вихорів, що переміщуються вниз за потоком. Вузька темна смуга 5 на

кормовій частині ребра являє собою область зриву потоку із задньої гострої кромки ребра.

Головною особливістю течії в лобовій прикореневій частині труби, що несе оребрення, є наявність складних тривимірних відривних циркуляційних течій, пов'язаних з розвитком пограничного шару на поверхні ребра. У цій області спостерігається система темних 6 і світлих 7 вигнутих смуг, які відповідають місцям відриву від поверхні ребра і приєднання до неї вторинних течій. Ближче до передньої крайки ребра спостерігаються треки 8, в яких вгадується зустрічний до основного потоку рух середовища. Коротка темна смуга 9 відповідає відриву при зустрічі основної і вторинної течій. По мірі віддалення від повздовжньої осі труби ця смуга трансформується в описану раніше область 1. При розвитку течії вниз за потоком утворюється область 10 прискореного, внаслідок зменшення перетину каналу, потоку. В області міделевого перетину плоско-овальної труби прискорений потік відривається від профілю труби з утворенням вихорових пухирів 11, які в подальшому, внаслідок взаємодії з потоком, що рухається з фронту ребра, згортаються у вихорові джгути 12, що розвиваються в кутовій області між ребром і трубою, що несе оребрення, вздовж потоку до задньої частини труби. Біля задньої

частини труби, що несе оребрення, в місці стикування її прямих і криволінійної частин, відбувається зрив потоку з поверхні профілю (13), що супроводжується, як показано нижче, деяким збільшенням статичного тиску. За криволінійною частиною труби, що несе оребрення, утворюється кормова вихорова область 14, яка характеризується низкими значеннями локальних швидкостей.



а – нанесення саже-газової суміші в прикореневій частині ребра; б – нанесення саже-газової суміші на всю поверхню ребра
Рис. 4. Візуалізація течії на поверхні ребра частково оребреної плоско-овальної труби

неповним оребренням (рис. 4, а, б) відсутня ділянка ребра перед лобовою частиною труби, що несе оребрення, яка вилучає можливість утворення розглянутих вище

складних тривимірних структур за винятком невеликих ділянок 10 примикання ребра до криволінійної частини поверхні плоско-овальної труби. Основний турбулізуючий ефект, який визначає рівень інтенсивності теплообміну, пов'язаний в цьому випадку із 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, який є зоною підвищеного статичного тиску.

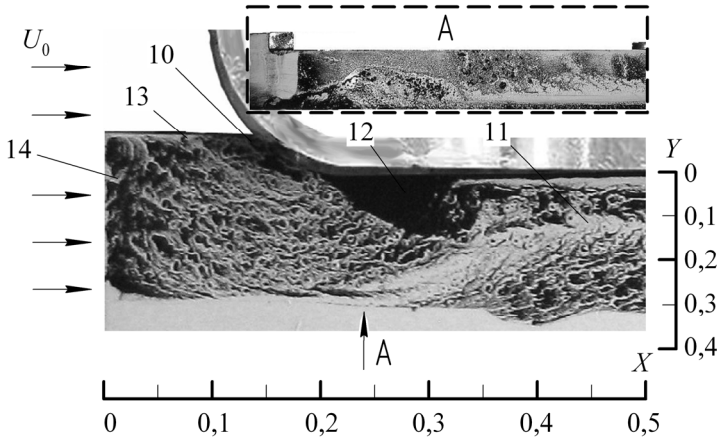
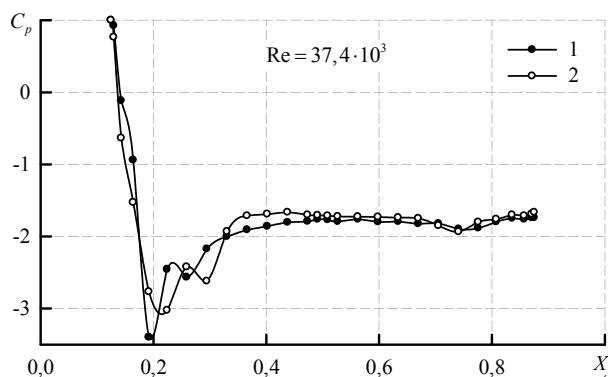


Рис. 5. Візуалізація течії в передній області лобової частини поверхні ребра частково оребреної плоско-овальної труби та в міжреберному просторі. $Re = 25 \cdot 10^3$

нормалі до ребра перевищує половину ширини міжреберного простору, що свідчить про наявність взаємодії між вихоровими структурами, які виникають на суміжних ребрах. Це, в свою чергу, призводить до додаткової турбулізації потоку в прикореневій частині міжреберного простору.

Турбулізації також сприяє генерація вихорів в прикореневій області 10 і на ділянках 13, 14 гострої крайки ребра. Про більш високий рівень збуреності потоку в міжреберному просторі неповністю оребреної труби свідчить також пізніший відрив потоку від поверхні труби в кормовій її частині 15 і менші розміри кормової циркуляційної зони в порівнянні з випадком повністю оребреної труби.



1 – труба з неповним оребренням;
2 – повністю оребрена труба

Рис. 6. Розподіл статичних тисків по периметру плоско-овальних труб

$X \approx 0,2$, пов'язаний з наростанням пограничного шару на трубі, що несе оребрення,

Пересічні потоки утворюють інтенсивні вихорові структури у вигляді вихорових джгутів 11 (рис. 4, а, 5), що розвиваються вздовж прикореневої частини ребра. Тривимірність і турбулізація течії посилюються внаслідок взаємодії цих структур з пограничним шаром, який розвивається на трубі, що несе оребрення і відривом потоку від її поверхні з утворенням відривних пухирів 12. На рис. 5 спостерігається винесення саже-газової суміші з поверхні ребра на стінку труби, що несе оребрення, а розмір пухиря по

Результати вимірювання розподілів статичних тисків по периметру плоско-овальних труб у центральній частині міжреберного каналу (рис. 6) показують різку зміну тиску і його градієнту в області утворення відривних пухирів. Відривний пухир, що утворюється при омиванні повністю оребреної труби є більш витягнутим вздовж потоку ніж для труби з неповним оребренням. На кривих $C_p(X)$ чітко виражені два мінімуми. Перший, при

з його подальшим відривом і приєднанням, як це має місце у випадку обтікання круглого циліндра. Другий мінімум (для повністю оребреної труби при $X \approx 0,26$, для частково оребреної – при $X \approx 0,3$) виникає внаслідок взаємодії пограничного шару, який після відриву приєднався до несучої труби, з потоком, що рухається з фронту ребра. У випадку частково оребреної труби на описані вище структури накладається вихоровий джгут, утворений внаслідок відриву в області 13 (рис. 5).

Експериментальні дані з розподілу безрозмірних коефіцієнтів тиску по поверхні ребра частково (а) і повністю (б) оребреної плоско-овальної труби (рис. 7) підтверджують висновки щодо умовного розділення поверхні ребер на прикореневу і периферійну частини. Наявність позитивних градієнтів тиску свідчить про складний відривний характер течії в прикореневій частині ребер. Гладкість і монотонність зміни коефіцієнтів тиску в периферійній частині ребер дозволяє зробити висновок, що тут течія мало відрізняється від течії на поверхні пластини.

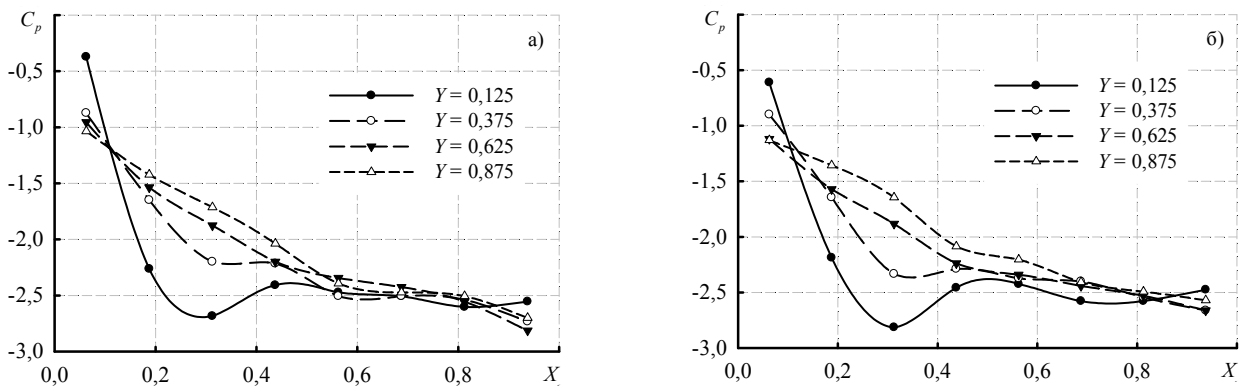


Рис. 7. Розподіл безрозмірних коефіцієнтів тиску по довжині ребер частково (а) і повністю (б) оребреної плоско-овальної труби. $Re = 37,4 \cdot 10^3$

Важливою характеристикою при дослідженнях процесів теплообміну та аеродинаміки теплообмінних поверхонь (особливо при CFD-моделюванні) є структура течії в каналі перед дослідними зразками (у вхідному перетині розрахункової області). Результати вимірювання характеристик течії – осереднених у часі швидкостей u та їх пульсацій u' в каналі робочої ділянки аеродинамічного стенда перед встановленою в ньому моделлю плоско-овальної труби з неповним поперечним оребренням (рис. 8) свідчать про те, що профіль швидкості в каналі має вигляд характерний для розвиненої турбулентної течії (рис. 8, а), а розподіл пульсацій швидкості характерний для розвиненої турбулентної течії в каналах і добре узгоджується з літературними даними (рис. 8, б).

При наближенні до лобової частини моделі ступінь турбулентності потоку поступово збільшується (рис. 8, б). Була отримана залежність для визначення ступені турбулентності в робочій ділянці перед встановленими моделями, %

$$Tu_0 = 0,52 \left(\frac{x_0}{d_1} \right)^{-1} + Tu_\infty. \quad (10)$$

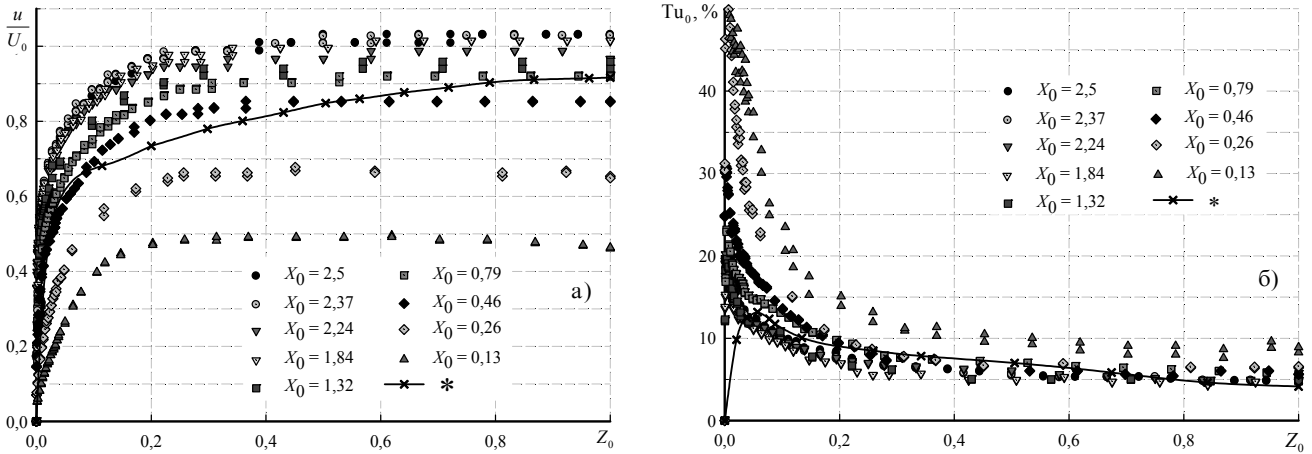
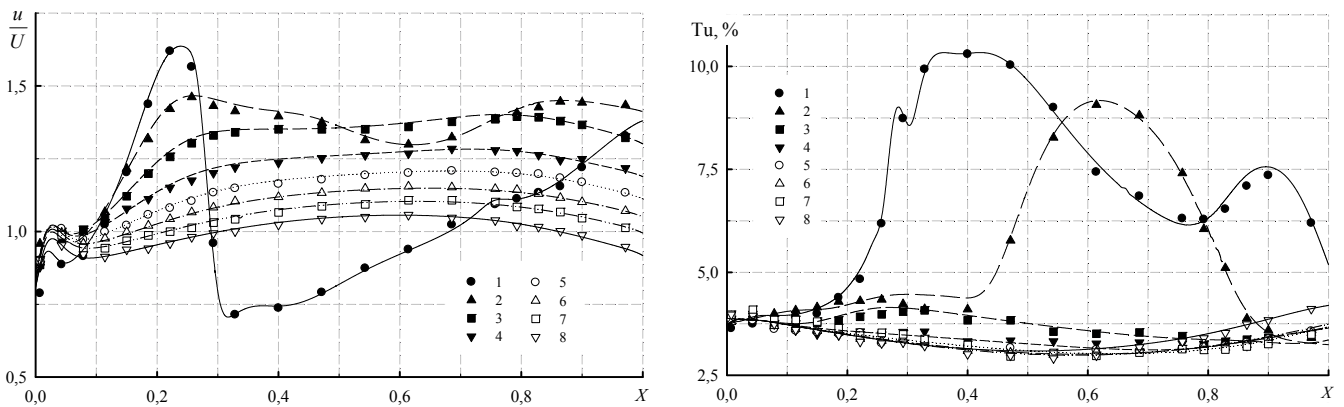


Рис. 8. Розподіл осереднених у часі швидкостей (а) та ступеню турбулентності (б) по висоті каналу в площині $Y_0 = 0$

Термоанемометричні дослідження характеристик течії в центральній горизонтальній площині міжреберного каналу – пульсацій швидкості і ступеню турбулентності (рис. 9) проведені в ізотермічному ($T \approx 20^\circ\text{C}$) потоці повітря при $Re \approx 50 \cdot 10^3$.



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

Рис. 9. Розподіл осереднених у часі швидкостей (а) та ступеню турбулентності (б) по висоті каналу в площині $Y_0 = 0$ (точки – експеримент; лінії – CFD-моделювання)

На рис. 9, а видно стрибкоподібне збільшення швидкості біля гострої вхідної крайки ребра (при $X < 0,03$) 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 $Y < 0,5$ зі значними градієнтами швидкості і периферійну $Y \geq 0,5$ з помірними градієнтами швидкості. Значний градієнт швидкості в області $Y < 0,2$, $X = 0,1..0,25$ пов'язаний із 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 орбрення. Різке падіння швидкості при $X = 0,25 - 0,32$ 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 міжреберного каналу. Все

вищесказане можна трактувати як утворення тривимірного вихорового джгута. Це підтверджується рис. 9, б, на якому представлені розподіли ступеню турбулентності в міжреберному каналі плоско-овальної труби. Крім того, на рис. 9,б видно збільшення ступеню турбулентності в перетині $Y = 0,13$ при $X = 0,5..0,8$, що свідчить про розвиток вказаних вихорових структур як вниз за потоком, так і вздовж висоти ребра, тобто про їх тривимірність. Стрибок ступеню турбулентності при $Y = 0,054$, $X = 0,85..0,9$ пов'язаний з відриванням потоку від поверхні труби, що несе оребрення в місці з'єднання її кормової частини з ребром. При збільшенні безрозмірної координати Y розподіли швидкості та ступеня турбулентності стають більш рівномірними і в периферійній частині ребра течія має характер, подібний до течії в напіввідкритому каналі.

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 вихорових структур призводить до турбулізації потоку в прикореневій частині ребра при $X > 0,2$ і тим самим до інтенсифікації теплообміну по всій її поверхні.

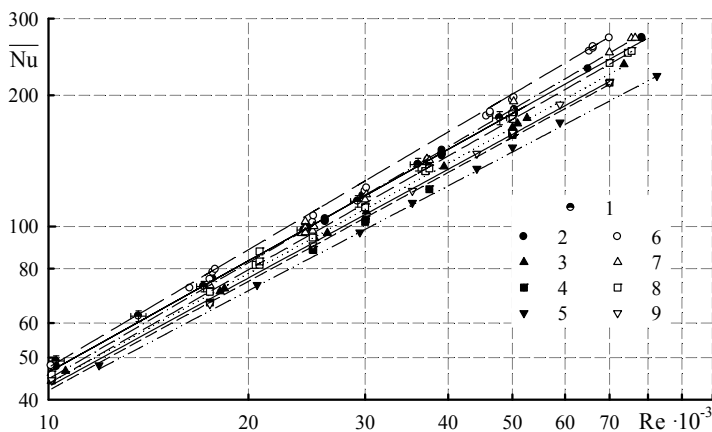
У **четвертому розділі** представлені результати дослідження середньоповерхневого та локального теплообміну плоско-овальних оребрених труб.

За результатами експериментального дослідження середньоповерхневого теплообміну проведена верифікація методики CFD-моделювання (рис. 10). Отримані дані свідчать про доцільність узагальнення результатів степеневою залежністю виду

$$\overline{Nu} = C_q Re^m. \quad (11)$$

Результати дослідження теплообміну

моделей плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням (рис. 10) свідчать про зниження інтенсивності теплообміну при зменшенні висоти ребер h при фіксованих значеннях відносного видовження профілю труби, що несе оребрення d_2/d_1 та відстані від крайки ребра до стінки каналу B_1 . Водночас, при зменшенні d_2/d_1 з 2,8 до 2, та фіксованій відстані від крайки ребра до стінки каналу B_1 інтенсивність теплообміну для труб з відповідними висотами ребер дещо збільшується. Математична обробка показала, що розшарування даних на рис. 10 відбувається в залежності від коефіцієнта оребрення ψ та відношення h/d_2 . В результаті



1 – експеримент; 2 – 5 – CFD-моделювання, $d_2/d_1 = 2,8$, $h/d_2 = 0,533; 0,39; 0,248; 0,105$;
6 – 9 – CFD-моделювання, $d_2/d_1 = 2,0$,
 $h/d_2 = 0,737; 0,539; 0,342; 0,145$ відповідно

Рис. 10. Середньоповерхневий теплообмін досліджених моделей

узагальнення отримані емпіричні залежності для коефіцієнта C_q та показника степені m від комплексу $(h/d_2)/\psi$ в (11) і узагальнююче рівняння подібності для розрахунку інтенсивності середньоповерхневого теплообміну

$$\overline{Nu} = 0,04 \left(1 - 14,3 \frac{h/d_2}{\psi} \right) \cdot Re^{0,69 \left(1 + 6 \frac{h/d_2}{\psi} \right)}, \quad (12)$$

яке описує наведені на рис. 10 результати з похибкою, що не перевищує $\pm 4\%$.

Дослідження впливу ступені турбулентності зовнішнього потоку Tu_∞ (рис. 11, а) при її збільшенні від 0,13% і 10,1% показують, що відносна інтенсивність теплообміну зростає на 11%. Дослідження впливу висоти ребра на відносну середньоповерхневу інтенсивність теплообміну (рис. 11, б) при фіксованому коефіцієнті захарачення каналу, показали її зростання на 18% при зменшенні h/d_1 від 1,49 до 0,29.

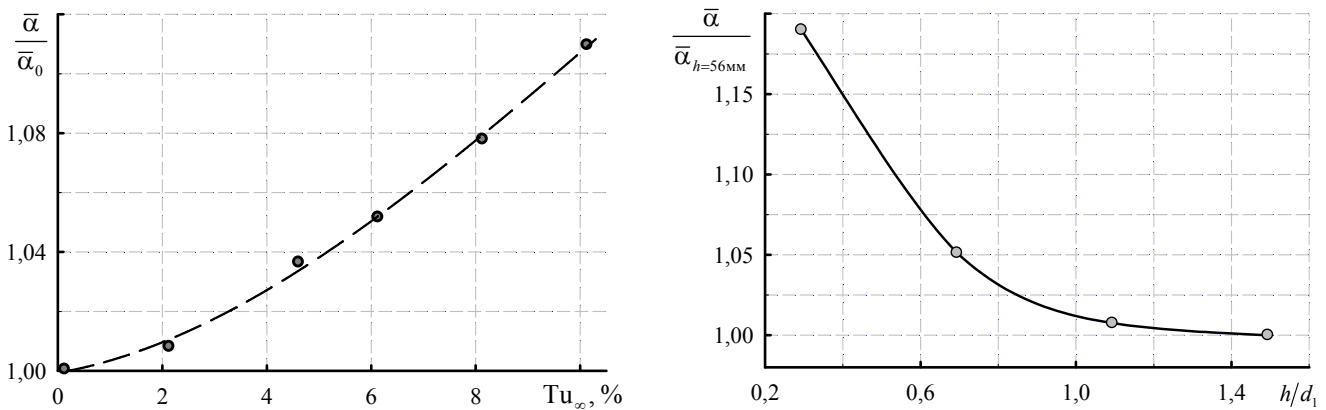


Рис. 11. Вплив Tu_∞ (а) та відносної висоти ребра h/d_1 (б) на $\bar{\alpha}$. $Re \approx 50 \cdot 10^3$

Результати визначення коефіцієнта ефективності ребра підтверджують запропоновані в дисертації Багрія П. І. підходи, доповнюють базу експериментальних даних та розширюють діапазон використання запропонованих ним розрахункових залежностей.

Розподіли інтенсивності теплообміну по поверхні ребра (рис. 12) підтверджують припущення про розділення його поверхні на дві майже рівні частини – периферійну і прикореневу.

В передній частині ребра біля його вхідної гострої крайки при $X = 0 \dots 0,1$ утворюється локальний максимум інтенсивності теплообміну, що відповідає відриванню потоку з подальшим його приєднанням (область 1, рис. 4). Цей екстремум спостерігається по всій висоті ребра і має найбільше абсолютне значення поблизу координати $Y \approx 0$ і зменшується при збільшенні Y вздовж крайки ребра, що цілком корелюється з розподілом статичного тиску на поверхні. В перетинах $Y = 0,0318 - 0,328$ наявний другий максимум інтенсивності теплообміну, координати якого збільшуються від $X \approx 0,03$ до $X \approx 0,32$ при збільшенні Y . Цей максимум пояснюється утворенням в цій області потужного вихорового джгута внаслідок перехресної взаємодії потоків, описаної вище. Відносна інтенсивність

теплообміну на значній частині (до $X = 0,8$) вказаної області більша 1. При $X > 0,8$ інтенсивність теплообміну дещо зменшується, що пов'язано зі зменшенням локальних швидкостей потоку внаслідок збільшення прохідного перетину каналу.

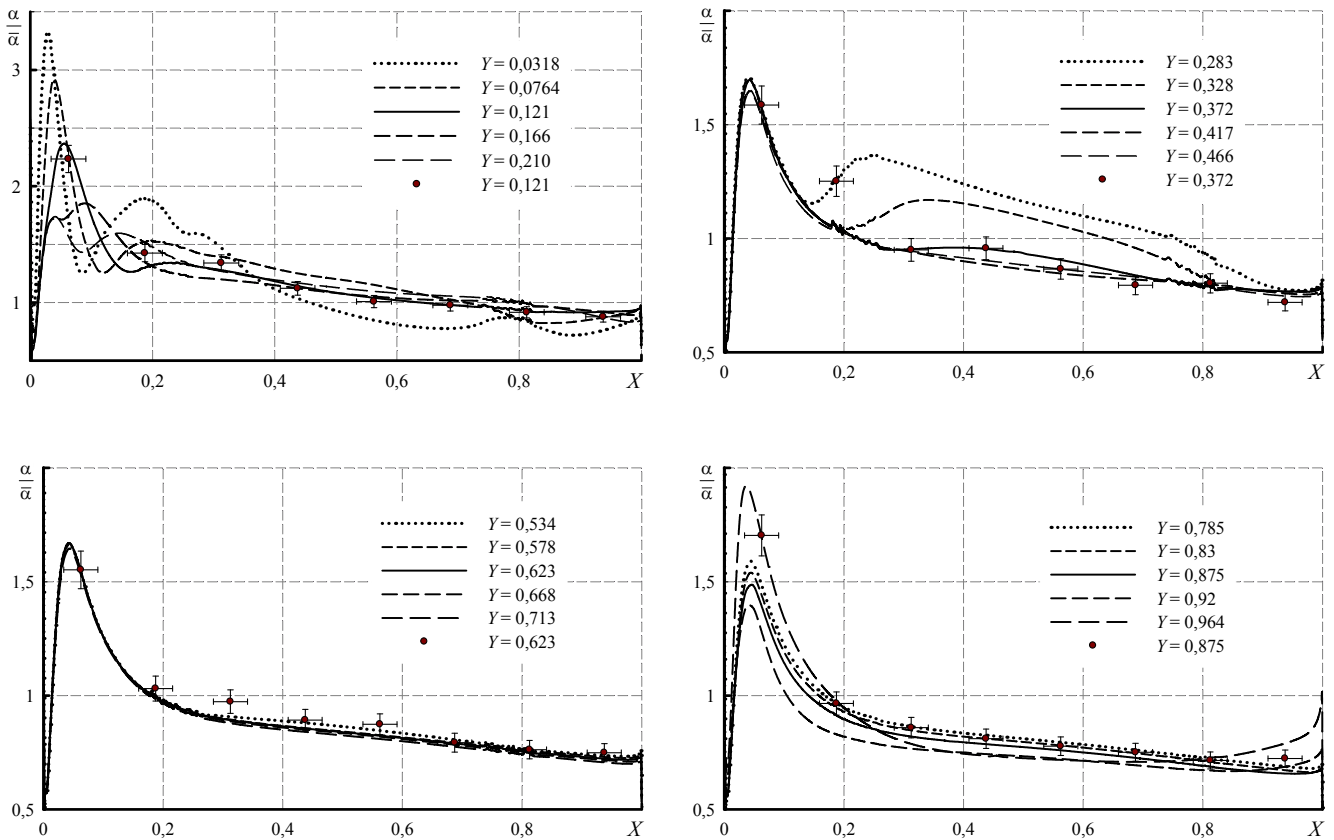


Рис. 12. Розподіл інтенсивності теплообміну по поверхні ребра (точки – експеримент; лінії – CFD-модельовання). $Re \approx 50 \cdot 10^3$

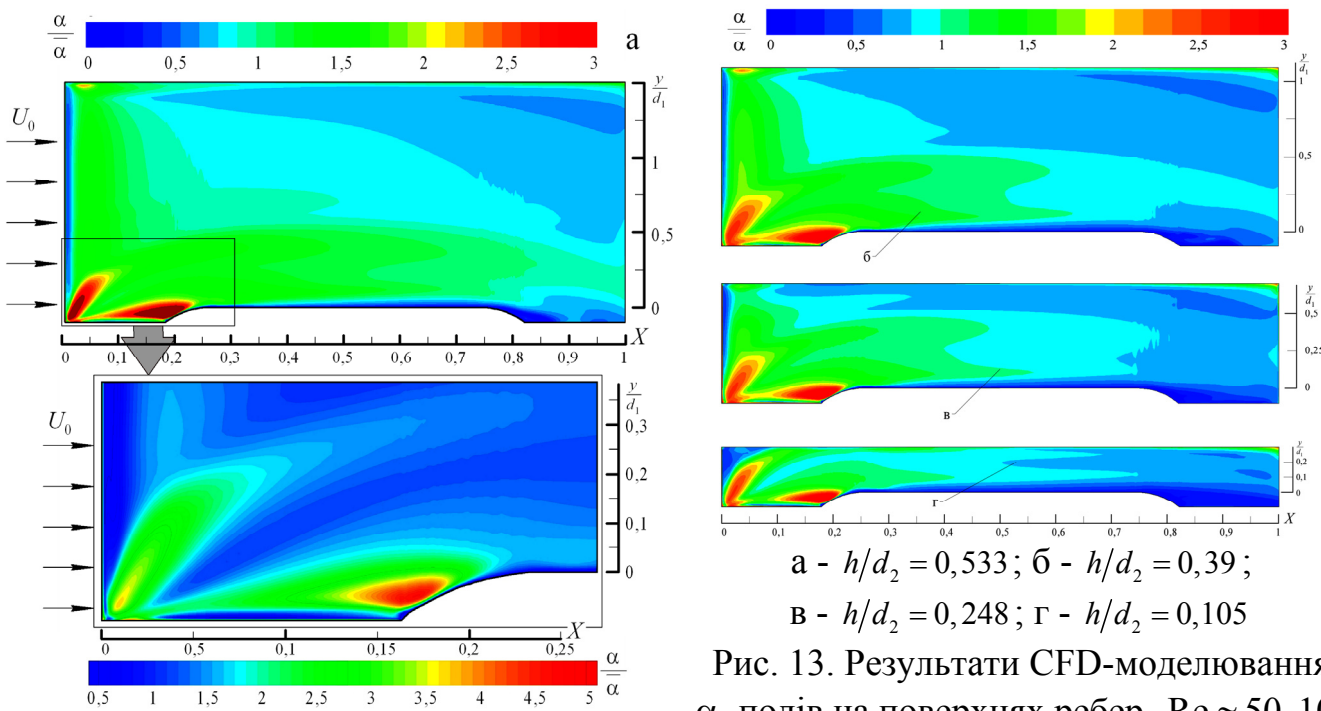


Рис. 13. Результати CFD-модельовання α -полів на поверхнях ребер. $Re \approx 50 \cdot 10^3$

При зменшенні висоти ребра зазначені особливості теплообміну і розміри прикореневої області зберігаються майже постійними, в той час як розміри периферійної частини ребра зменшуються (рис. 13).

Ґрунтуючись на результатах досліджень, викладених у розділі 3 (візуалізації течії, полів статичних тисків на поверхнях ребер, характеристик і структури в міжреберних каналах), а також наведених вище даних аналізу полів коефіцієнтів теплообміну, картина течії та локального теплообміну на поверхні ребреної плоско-овальної труби була узагальнена у вигляді фізичної моделі (рис. 14).

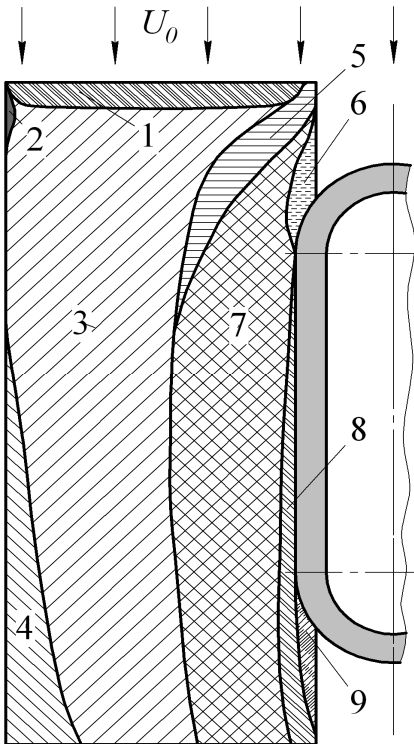


Рис. 14. Схема характерних областей на поверхні ребра

Відповідно до цієї моделі на поверхні ребра мають місце, щонайменше, дев'ять характерних за умовами течії та інтенсивності теплообміну областей:

1 – зона відриву потоку від гострої вхідної крайки з подальшим його приєднанням з наявністю від'ємного поперечного градієнта тиску і утворенням складного тривимірного джгута. Характеризується різким ростом відносної інтенсивності теплообміну $\alpha/\bar{\alpha}$ до значень 1,5 – 3 з подальшим більш помірним, ніж зростання зниженням;

2 – зона відриву потоку з крайки ребра внаслідок взаємодії вихорових структур області 1 з потоком в каналі за межами ребра і в міжреберному просторі. Характеризується високими (до 2 – 2,5) значеннями $\alpha/\bar{\alpha}$;

3 – зона безвідривної течії з витісненням потоку з міжреберного простору внаслідок наростання товщини пограничного шару. Характеристики в цій області в цілому відповідають характеру течії і теплообміну при повздовжньому омиванні плоскої поверхні (пластини). Іntenсивність теплообміну в даній області нижча за середньоповерхневу – значення $\alpha/\bar{\alpha}$ поступово

знижуються вниз за потоком і складають 0,7 – 0,9;

4 – область затікання потоку з незахарашеної області каналу на поверхню ребра внаслідок додатного поперечного градієнта тиску. Відношення $\alpha/\bar{\alpha}$ тут дещо вище ніж в області 3, але залишається нижчою за середньоповерхневу;

5 – область інтенсивних перехресних (пересічних) вихорових структур з високою інтенсивністю теплообміну ($\alpha/\bar{\alpha}$ досягає значень 3,5 – 4);

6 – область утворення вихорового джгута внаслідок взаємодії відривного потоку з гострої бічної крайки ребра з елементом підковоподібного вихора, котрий генерується в місці з'єднання ребра та криволінійної частини труби (поз. 10, рис. 4, 5). Відносна інтенсивність теплообміну $\alpha/\bar{\alpha}$ в цій області досягає максимальних значень – 4,5 – 5 і вище;

7 – область вторинних інтенсивних рециркуляційних течій. В цій області вихорові джгути, утворені в зонах 5 і 6, розвиваються вниз за потоком. При цьому $\alpha/\bar{\alpha}$ має значення 1,5 – 2, поступово знижуючись вниз за потоком;

8 – розвиток пограничного шару на прямолинійній частині труби, що несе оребрення. В цій області $\alpha/\bar{\alpha}$ приймає значень близько 0,5;

9 – відривна течія в кормовій зоні труби, що несе оребрення. Розміри її відносно малі за рахунок зручнообтічності самого профілю труби. Інтенсивність теплообміну в даній області невисока, але і внесок її в середньповерхневий теплообмін незначний внаслідок її малої площі.

П'ятий розділ присвячений розробці рекомендацій щодо вибору оптимальних за теплоаеродинамічними та масогабаритними показниками геометричних

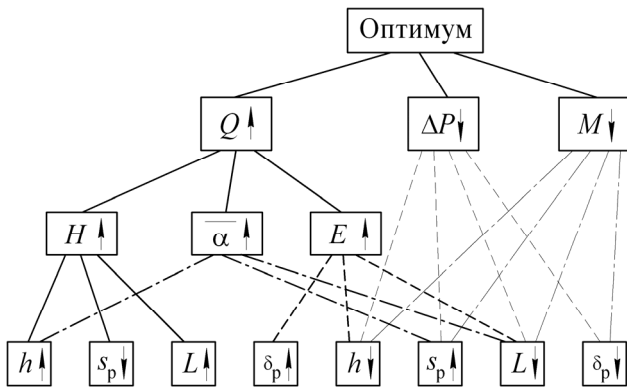
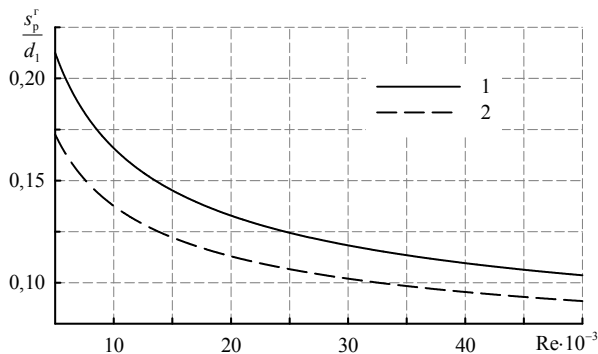


Рис. 15. Вплив параметрів оребрення h , s_p , L , δ_p на Q , ΔP і M

характеристик поперечного оребрення плоско-овальних труб в залежності від режиму їх роботи. Розроблено методику та програму (в середовищі Mathcad 15) розрахунку оптимальних характеристик.

Аналіз отриманих в попередніх розділах розрахункових залежностей показав, що при фіксованому значенні відношення d_2/d_1 на величину теплового потоку Q , аеродинамічний опір ΔP і масу труб M неоднозначно впливають геометричні характеристики (рис. 15).

Зменшення кроку ребер дозволяє значно збільшувати поверхню одного погонного метра труби і водночас призводить до підвищення аеродинамічного опору. Проведена оцінка граничного (мінімального) кроку ребер s_p^r (рис. 16) виконана з точки зору недопущення суттєвого збільшення ступені витіснення потоку з міжреберного простору внаслідок змикання пограничних шарів на поверхнях суміжних ребер.



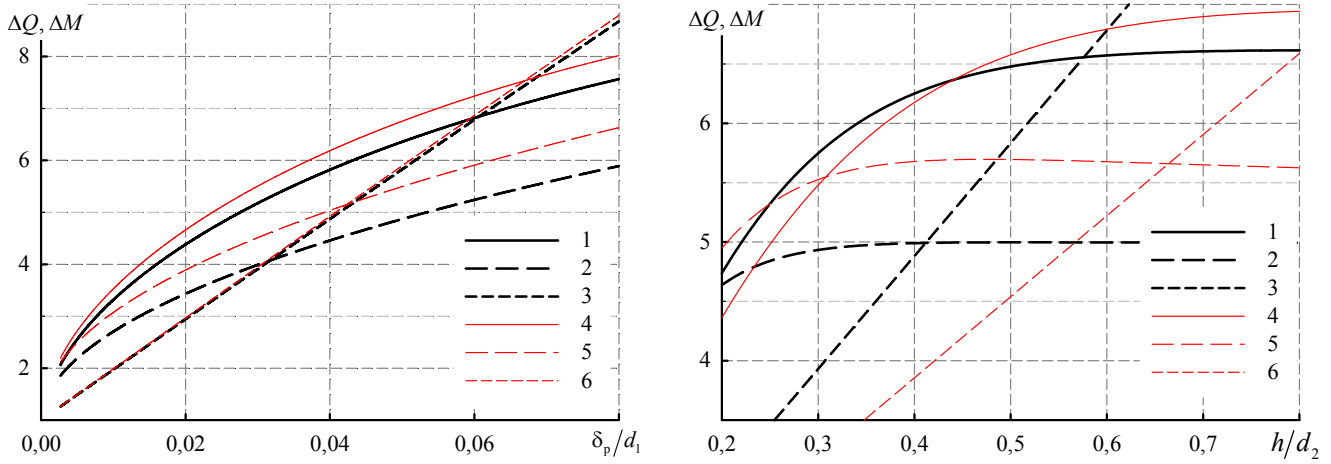
1 – $d_2/d_1 = 2,8$; 2 – $d_2/d_1 = 2,0$

Рис. 16. Залежність s_p^r від Re

Визначення характеристик плоско-овальної оребреної труби в залежності від товщини ребер δ_p проведено на основі аналізу збільшення теплового потоку з поверхні оребреної труби відносно неоребреної та збільшення її маси (рис. 17, а).

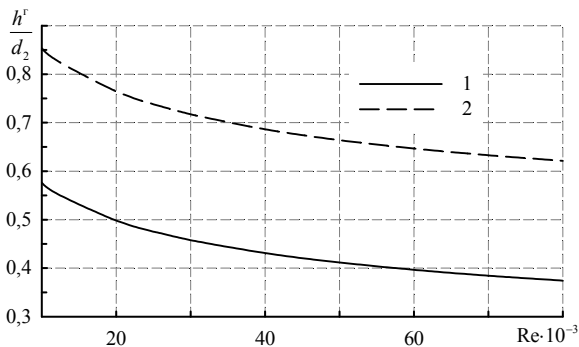
Виконана оцінка впливу висоти ребра h на теплові і масогабаритні характеристики теплообмінних поверхонь з плоско-овальних труб за показниками ΔQ і ΔM при постійних товщинах і кроках ребер (рис. 17, б).

Виявлено, що існує певне граничне значення висоти ребра (рис. 18), перевищення якого приводить до несуттєвого збільшення теплового потоку з поверхні труби при монотонно зростаючій масі теплообмінної поверхні.



1 – ΔQ , $d_2/d_1 = 2,8$, $Re = 10 \cdot 10^3$; 2 – ΔQ , $d_2/d_1 = 2,8$, $Re = 50 \cdot 10^3$; 3 – ΔM , $d_2/d_1 = 2,8$;
 4 – ΔQ , $d_2/d_1 = 2,0$, $Re = 10 \cdot 10^3$; 5 – ΔQ , $d_2/d_1 = 2,0$, $Re = 50 \cdot 10^3$; 6 – ΔM , $d_2/d_1 = 2,0$

Рис. 17. Збільшення теплового потоку та маси плоско-овальної ребреної труби за рахунок збільшення товщини ребра δ_p (а) та висоти ребра h (б)



1 – $d_2/d_1 = 2,8$; 2 – $d_2/d_1 = 2,0$

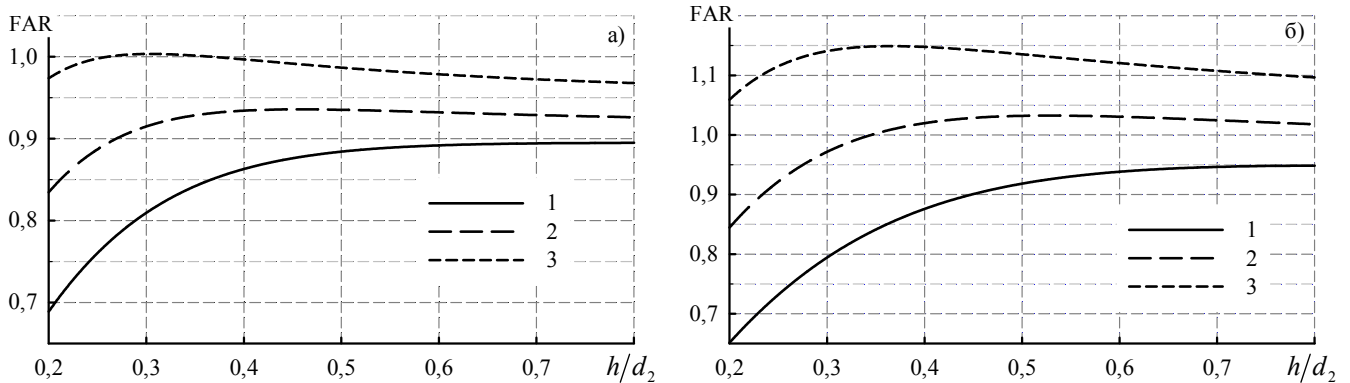
Рис. 18. Залежність h^Γ від Re

характеристик значення висоти ребра h (рис. 19).

Аналіз впливу висоти поперечних ребер h на теплоаеродинамічні характеристики плоско-овальних труб, проведений за модифікованим фактором аналогії Рейнольдса

$$FAR = \frac{\Delta Q}{Eu/Eu_0} = \frac{Nu_{np} \cdot \psi / \sqrt{Nu_0}}{Eu/Eu_0} \quad (13)$$

показав, що при певних значеннях d_2/d_1 , s_p , L , δ_p і при певному режимі роботи теплообмінної поверхні існує оптимальне з точки зору теплоаеродинамічних



а – $d_2/d_1 = 2,8$; б – $d_2/d_1 = 2,0$; 1 – $Re = 12,5 \cdot 10^3$; 2 – $Re = 25 \cdot 10^3$; 3 – $Re = 50 \cdot 10^3$

Рис. 19. Залежність модифікованого фактору аналогії Рейнольдса від безрозмірної висоти ребер плоско-овальної труби

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена комплексна задача фізичного обґрунтування високої інтенсивності теплообміну плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням при доволі низьких значеннях їх аеродинамічного опору.

Використання комплексного підходу для проведення досліджень (експериментальних і CFD-методів) дозволило отримати надійні базові експериментальні дані, провести верифікацію CFD-моделей на основі порівняння результатів, отриманих методами фізичного та CFD-моделювання, та дослідити процеси переносу в широкому діапазоні геометричних характеристик моделей.

Виконана багатопланова комплексна робота, в результаті якої можна зробити наступні висновки.

1. Дослідження середньоповерхневого конвективного теплообміну та аеродинамічного опору плоско-овальних труб з неповним оребренням в інтервалі значень геометричних і режимних параметрів: $\psi = 4,2 - 14,8$, $h/d_2 = 0,105 - 0,737$, $Re = (10 - 90) \cdot 10^3$ дозволили отримати узагальнюючі залежності, які враховують вплив на інтенсивність теплообміну та аеродинамічний опір геометричних параметрів оребрення труб. Розрахункові залежності забезпечують розбіжність із дослідними даними не більше, ніж $\pm 4\%$ для інтенсивності теплообміну і $\pm 8\%$ для аеродинамічного опору. Виявлено, що інтенсивність теплообміну та аеродинамічний опір залежать від геометрії труб і при варіюванні параметра h/d_2 від 0,105 до 0,737 змінюються: на (25...28)% теплообмін і на (18...20)% аеродинамічний опір. Показано, що при збільшенні ступені турбулентності зовнішнього потоку Tu_∞ від 0,13% і 10,1% відносна інтенсивність теплообміну однорядних систем з плоско-овальних ореблених труб зростає на $\sim 11\%$.

2. Комплексні дослідження характеристик та структури течії на поверхнях плоско-овальних труб методами вимірювання статичних тисків, термоанемометрії, поверхневої візуалізації потоку та CFD-моделювання дозволили виявити наступні особливості. Течія на поверхні труб носить складний тривимірний відривний характер – виявлено як мінімум 3 області відриву потоку від поверхні ребра і дві – від поверхні труби, що несе оребрення. На поверхні ребра присутні області зі значно підвищеним рівнем збуреності потоку. Виявлено, що поверхня ребра поділяється на дві частини – прикореневу і периферійну зі значно різними характерами течії.

3. Дослідження локального теплообміну на поверхні ребра дозволили виявити області, інтенсивність теплообміну в яких значним чином (до 5 разів) перевищує середньоповерхневу. Отримані результати є експериментальним підґрунтям для визначення температурних режимів роботи теплообмінного обладнання з плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням.

4. Комплексний аналіз результатів дослідження гідродинамічних характеристик та локального теплообміну показав, що інтенсивність теплообміну в прикореневій і периферійній областях ребра значно відрізняється (до 2-3 разів в одному поперечному перетині). На основі проведеного аналізу була розроблена фізична модель теплообміну та течії на поверхні прямокутного ребра плоско-овальної труби, яка ілюструє як мінімум 9 характерних областей на його поверхні.

5. Розроблені методика та програма розрахунку геометричних характеристик поперечного оребрення плоско-овальних труб, які дозволяють визначати оптимальні значення товщини, кроку та висоти ребер (з точки зору співвідношення теплоаеродинамічних та масогабаритних характеристик), враховуючи їх взаємозв'язок та режимні параметри роботи теплообмінної поверхні.

6. Отримані в роботі експериментальні дані, а також узагальнюючі залежності для розрахунку інтенсивності конвективного теплообміну і аеродинамічного опору однорядних систем плоско-овальних труб з неповним оребренням та підтвержені емпіричні залежності для розрахунку коефіцієнта ефективності ребра, а також рекомендації щодо вибору оптимальних геометричних характеристик оребрення плоско-овальних труб, можуть бути застосовані при проектуванні і виготовленні нових високоефективних теплообмінних пристроїв.

Результати дисертаційної роботи використані ТОВ „НВФ „Ганза” при проектуванні теплоутилізатора для газопоршньової машини FG Wilson-1000 ПрАТ "Ветропак Гостомельський Склозавод", а також застосовуються в навчальному процесі теплоенергетичного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- статті у наукових фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Терех А. М., Багрий П. И., Литвиненко Н. Н., Николаенко Ю. Е., Семеняко А. В. Испытания опытного образца модуля воздушного охладителя. *Пром. теплотехника*. 2008. Т. 30. № 2. С. 15 – 20. **(РІНЦ)**.

У публікації здобувачу належить розробка методів вимірювань теплотехнічних показників охолоджувача, проведення їх вимірювань та розрахунок похибок отриманих даних з втрат тиску і порівнювання його значень з розрахунковими.

2. Письменный Е. Н., Терех А. М., Семеняко А.В., Рогачев В. А., Бурлей В. Д. Тепловая эффективность коридорных пучков поперечно-оребрённых труб различного профиля. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2010. № 2/7 (44). С. 4 – 8. **(Index Copernicus, РІНЦ)**.

Здобувач виконав порівняльну оцінку теплової ефективності коридорних пакетів плоско-овальних труб з неповним оребренням з ідентичними за кроками між трубами коридорними пакетами біметалевих круглоребристих труб.

3. Письменный Е. Н., Демченко В. Г., Терех А. М., Семеняко А. В., Кулик К. В. Экономайзер-утилизатор из плоско-овальных труб с неполным оребрением. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2010. № 3/1 (45). С. 15 – 19. **(Index Copernicus, РІНЦ)**.

Здобувач виконав порівняльні теплоаеродинамічні розрахунки економайзера з плоско-овальних ребристих труб та економайзера з круглоребристих труб на однакову теплову потужність.

4. Руденко А. И., Терех А. М., Семеняко А. В., Нищик А. П., Баранюк А. В. Метод визуализации течения газового потока на поверхности тел различной формы.

Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2011. № 1/9 (49). – с. 51 – 55. **(Index Copernicus, PИHЦ)**.

У публікації здобувачу належить підготовка саже-газової суміші певного складу, проведення досліджень з візуалізації течії на поверхнях труб різного профілю.

5. Терех О. М., Семеняко О. В., Рогачов В. А., Баранюк О. В., Багрій П. І. Теплоаеродинамічна ефективність пакетів труб з поперечними ребрами. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2012. № 2/8 (56). С. 31 – 37. **(Academic Search Complete, CAPlus, Index Copernicus, PИHЦ)**.

Здобувач виконав порівняльну оцінку теплоаеродинамічної ефективності пакетів труб з поперечним оребренням.

6. Терех О. М., Семеняко О. В., Туз В. О., Кондратюк В. А. Обтікання поодиноких циліндрів в поперечному потоці. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2013. № 2/8 (62). С. 23 – 26. **(Academic Search Complete, CAPlus, Index Copernicus, PИHЦ)**.

У публікації здобувачу належить проведення аналізу картин обтікання поодиноких циліндрів плоско-овального профілю та порівняння отриманих даних з даними щодо круглих труб.

7. Терех О. М., Семеняко О. В., Туз В. О., Руденко О. І., Кондратюк В. А. Теплообмін циліндрів плоскоовального профілю при поперечному їх обтіканні. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2013. № 3/8 (63). С. 30 – 34. **(Academic Search Complete, CAPlus, Index Copernicus, PИHЦ)**.

У публікації здобувачу належить проведення експериментів з теплообміну та аеродинамічного опору поодиноких плоско-овальних труб.

8. Вознюк М. М., Семеняко А. В., Бондар В. А. Оптимальная высота поперечных ребер плоско-овальной трубы. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. № 4. С. 60 – 65. **(Google Scholar, Index Copernicus та ін.)**.

Здобувач провів аналіз експериментальних та розрахункових даних щодо визначення оптимальної висоти.

9. Семеняко О. В. Термоанемометричні вимірювання характеристик течії в міжреберних каналах плоско-овальних труб. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2017. – № 4. С. 133 – 140. **(Google Scholar, Index Copernicus та ін.)**.

- статті у виданнях іноземних держав:

10. Жукова Ю. В., Терех А. М., Семеняко А. В. Численное моделирование нестационарного поперечного обтекания овального цилиндра при различных числах Рейнольдса. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2011. Т. 55. № 1. С. 102 – 108.

Здобувач провів порівняння результатів числового і експериментального моделювання обтікання плоско-овальної труби, провів оцінку збіжності даних по двом методам моделювання.

11. Письменный Е. Н., Багрій П. И, Терех А. М., Семеняко А. В. Оптимизация оребрения новой теплообменной поверхности на основе плоскоовальных труб. *Инженерно-физический журнал*. Сентябрь-октябрь 2013. Т. 86, № 5. С. 1002 – 1007.

Здобувач провів обробку експериментальних даних та брав участь в розрахунках з оптимізації оребрення плоско-овальних труб.

12. E. N. Pis'mennyi, P. I. Bagrii, A. M. Terekh, A. V. Semenyako Optimization of the ribbing of a new heat exchange surface of flat-oval tubes. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, October 2013. Vol. 86, No. 5. PP. 1066 – 1071.

Здобувач провів узагальнення експериментальних даних та розробив методіку оцінки оптимальних параметрів оребрення плоско-овальних труб.

13. Письменний Е. Н., Рогачов В. А., Баранюк А. В., Семеняко А. В., Вознюк М. М. CFD-моделирование процессов теплообмена труб удобообтекаемой формы с неполным поперечным оребрением. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2014. №1 (20), часть 1. С. 30 – 36.

У публікації здобувачу належить розробка CFD-моделі.

14. Письменний Е. Н., Рогачов В. А., Баранюк А. В., Семеняко А. В., Вознюк М. М. CFD-моделирование омывания поверхности труб удобообтекаемой формы с неполным поперечным оребрением. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2014. №2 (21), часть 1. С. 76 – 78.

Здобувач приймав участь в розробці CFD-моделі та аналізі результатів моделювання.

15. Никитюк П. С., Семеняко А. В., Терех О. М., Руденко А. И. Особенности обтекания плоскоовальной трубы в поперечном потоке. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2014. №3 (22), часть 2. С. 60 – 63.

Здобувач провів експериментальні дослідження та приймав участь в обробці і аналізі результатів.

- статті в інших виданнях:

16. Терех О. М., Семеняко О. В., Пузанов І. В. Узагальнений метод розрахунку конвективного теплообміну коридорних пакетів плоско-овальних труб з поперечним оребренням. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2009. № 1. С. 100 – 105.

У публікації здобувачу належить математичний опис залежностей показника степені і коефіцієнта при числі Рейнольдса від геометричних характеристик ребристих труб та кроків між ними, а також підсумкова оцінка похибки узагальнюючих залежностей.

17. Письменний Є. М., Терех О. М., Семеняко О. В., Кондратюк В. А. Розрахунок аеродинамічного опору коридорних пакетів плоско-овальних труб з неповним оребренням. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2010. № 1. С. 24 – 29.

У публікації здобувачу належить проведення досліджень аеродинамічного опору, обробка та узагальнення результатів досліджень.

18. Письменний Е. Н., Терех А. М., Семеняко А. В., Багрий П. И. Коэффициент эффективности прямоугольного ребра плоско-овальной трубы. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2010. № 2. С. 70 – 75.

У публікації здобувачу належить проведення вимірювання довжини лінії контакту прямокутного ребра і плоско-овальної труби після їх контактного зварювання, отримання залежності для розрахунку умовної висоти ребра.

- патенти України на корисну модель:

19. Спосіб візуалізації течії газового потоку: пат. 54180 Україна: МПК G01P 5/00. № u201006121. заявл. 20.05.2010; опубл. 25.10.2010. Бюл. №20. 4 с.

Здобувач запропонував і обґрунтував необхідну концентрацію саже-газової суміші.

20. Теплообмінна труба: пат. 87032 Україна: МПК F28F 1/10, 1/12, 13/00, 13/02. № u201304987. заявл. 18.04.2013; опубл. 27.01.2014. Бюл. № 2. 5 с.

Здобувач запропонував і обґрунтував типи і геометричні характеристики турбулізаторів на поверхнях труб.

- тези доповідей та матеріали конференцій:

21. Семеняко А. В., Письменный Е. Н. Течение на поверхности плоско-овальных труб с поперечным оребрением. „Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях”: труды XVII школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева. С. 132 – 134.

Здобувач провів експериментальні дослідження течії та полів статичних тисків на поверхнях плоско-овальних труб.

22. Жукова Ю. В., Терех А. М., Семеняко А. В. Аэродинамика и теплоотдача плоскоовального цилиндра при вынужденной конвекции. РНКТ5: труды пятой российской национальной конференции по теплообмену. Том 2. Вынужденная конвекция однофазной жидкости. 25 – 29 октября 2010 года. г. Москва. С. 126 – 128.

Здобувач провів аналіз експериментальних та розрахункових даних з теплообміну.

23. Письменный Е. Н., Семеняко А. В., Терех А. М. Теплообменное устройство из плоскоовальных труб с неполным оребрением. РНКТ5: труды пятой российской национальной конференции по теплообмену. Том 6. Интенсификация теплообмена. 25 – 29 октября 2010 года. г. Москва. С. 130 – 132.

Здобувач виконав теплоаеродинамічний розрахунок теплообмінного пристрою.

24. Семеняко А. В., Баранюк А. В., Письменный Е. Н. Верификация численной модели теплообмена плоско-овальных труб с неполным оребрением. „Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках”: труды XVIII школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева. (м. Звенигород, Росія, 23 – 27.10.2011 р.). С. 396 – 397.

Здобувач приймав участь в розробці CFD-моделі та у її верифікації.

25. Pysmennyu Ye., Semenyako A., Polupan G., Carvajal-Mariscal I. „Particularidades del flujo en la superficie de tubos ovalados con aletas transversals,” in Proc. VI Congreso internacional de ingenieria electromecanica y de sistemas, México, noviembre 2011, P. 16.

Здобувач провів експериментальні дослідження течії на поверхнях з плоско-овальних труб та аналіз отриманих даних.

26. Семеняко А. В., Рогачев В. А., Баранюк А. В. CFD-моделирование процессов теплообмена и гидродинамики плоско-овальных труб с неполным оребрением. Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики:

матеріали междунар. научн.-практ. школи-конф. (Україна, Крим, г. Алушта, 19 – 25 вересня 2011 г.). Днепропетровск: НПК „Триакон”, 2011. С. 23 – 28.

У публікації здобувачу належить розробка CFD-моделі та аналіз результатів моделювання.

27. Мацюк Г. М., Семеняко О. В. Теплообмін та аеродинаміка плоскоовальних труб з неповним оребренням. „Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики”: зб. тез доп. X міжнар. наук.-практ. конф. Київ, 2012. С. 70.

Здобувач провів експериментальні дослідження теплообміну плоско-овальних труб та аналіз отриманих даних.

28. Семеняко А. В., Письменный Е. Н., Терех А. М., Руденко А. И., Мацюк Г. Н. Оптимизация геометрических размеров оребрения плоскоовальной трубы. Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: матеріали междунар. научн.-практ. школи-конф. (Україна, Крим, г. Алушта, 17 – 23 вересня 2012 г.). Днепропетровск: НПК „Триакон”, 2012. С. 21 – 25.

У публікації здобувачу належить розробка методики та програми розрахунку оптимальних параметрів оребрення плоско-овальних труб.

29. Семеняко А. В. Эффективность ребра плоскоовальной трубы. „Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках”: труды XIX школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева. (Росія, м. Орехово-Зуєво, 20 – 24 травня 2013 г.) С. 339 – 340.

30. Нікітюк П. С., Семеняко О. В. Вплив геометричних параметрів на теплообмін плоскоовальних труб. „Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики”: зб. тез доп. XII міжнар. наук.-практ. конф. Київ, 2014. (м. Київ, 22 – 25.04.2014 р.). С. 69.

Здобувач провів експериментальні дослідження теплообміну плоско-овальних труб та аналіз отриманих результатів.

31. Бондар В. А., Семеняко О. В. Локальний теплообмін плоско-овальної труби з неповним поперечним оребренням. „Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики”: зб. тез доп. XIV міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 18 – 21.04.2016 р.). Київ, 2016. С. 77.

Здобувач провів експериментальні дослідження локального теплообміну плоско-овальних труб та аналіз отриманих результатів.

АНОТАЦІЯ

Семеняко О.В. Закономірності процесів переносу в теплообмінних поверхнях з плоско-овальних труб з поперечним оребренням. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального завдання розробки та обґрунтування наукових засад створення ефективних теплообмінних пристроїв з однорядних систем плоско-овальних оребрених труб, отриманих на основі вивчення

середньоповерхневих і локальних характеристик процесів переносу та визначення оптимальних геометричних характеристик оребрення.

У роботі виконані комплексні експериментальні та CFD-дослідження середньоповерхневого та локального теплообміну, аеродинамічного опору, характеристик і структури течії при омиванні плоско-овальних оребрених труб потоком газового теплоносія в діапазоні значень їх геометричних та режимних характеристик, актуальних для теплообмінного обладнання.

Отримані узагальнені рівняння подібності для розрахунку інтенсивності конвективного теплообміну та аеродинамічного опору однорядних теплообмінних систем з плоско-овальних оребрених труб, що враховують залежність показника степені при числі Рейнольдса від геометричних характеристик.

Представлені результати розподілів тиску та локальних коефіцієнтів теплообміну, візуалізаційних, термоанемометричних та CFD-досліджень, на основі яких розкриті закономірності механізмів переносу, узагальнені у вигляді фізичної моделі течії та теплообміну на поверхні ребер плоско-овальних труб.

Розроблені методика та програма розрахунку оптимальних геометричних характеристик поперечного оребрення плоско-овальних труб, яка враховує режимні параметри роботи теплообмінної поверхні.

Ключові слова: плоско-овальна труба, ребро, теплообмін, аеродинаміка, характеристики течії, термоанемометрія, локальні характеристики, ефективність, оптимізація.

АННОТАЦИЯ

Семеняко А.В. Закономерности процессов переноса в теплообменных поверхностях из плоско-овальных труб с поперечным оребрением. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2018.

Диссертация посвящена решению актуальной задачи разработки и обоснования научных основ создания эффективных теплообменных устройств из однорядных систем плоско-овальных оребренных труб, полученных на основании изучения среднеповерхностных и локальных характеристик процессов переноса и определения оптимальных геометрических характеристик оребрения.

В работе выполнены комплексные экспериментальные и CFD-исследования среднеповерхностного и локального теплообмена, аэродинамического сопротивления, характеристик и структуры течения при омывании плоско-овальных оребренных труб потоком газового теплоносителя в диапазоне значений их геометрических и режимных характеристик, актуальных для теплообменного оборудования.

При проведении исследований был применен комплексный подход к моделированию процессов переноса, который охватывал использование шести методов экспериментальных исследований процессов течения и теплообмена с

параллельным использованием на каждом этапе метода CFD-моделирования, что позволило углубить и расширить диапазон и широту полученных результатов. На каждом этапе исследований проводилась верификация и валидация результатов CFD-моделирования с экспериментальными данными. Определение среднеповерхностных и локальных коэффициентов конвективного теплообмена выполнено на основании результатов экспериментальных измерений распределений температур и тепловых потоков на поверхностях плоско-овальной трубы и оребрения. Определение аэродинамического сопротивления плоско-овальных оребренных труб основано на результатах измерения перепадов давлений. Для определения характеристик и структуры течения, степени турбулентности газового потока в межреберном канале и вблизи трубы применен метод термоанемометрии с использованием термоанемометра постоянной температуры с нагретой нитью. Изучение особенностей течения на стенках трубы и ребра осуществлялось методом поверхностной визуализации с помощью саже-керосиновой взвеси и по результатам измерения полей статических давлений. При проведении численных исследований теплогидродинамические процессы на поверхности плоско-овальной трубы с неполным поперечным оребрением изучались методами вычислительной гидрогазодинамики (CFD - моделирование).

Получены обобщенные уравнения подобия для расчета интенсивности конвективного теплообмена и аэродинамического сопротивления однорядных теплообменных систем из плоско-овальных оребренных труб, учитывающие зависимость показателя степени при числе Рейнольдса от геометрических характеристик. Определено влияние степени турбулентности набегающего на трубу потока на интенсивность среднеповерхностного теплообмена.

Представленные результаты распределений давлений и локальных коэффициентов теплообмена, визуализационных, термоанемометрических и CFD-исследований, на основе которых раскрыты закономерности механизмов переноса, обобщены в виде физической модели течения и теплообмена на поверхности ребер плоско-овальных труб. Полученные результаты являются экспериментальной основой для определения температурных режимов работы теплообменного оборудования из плоско-овальных труб с неполным поперечным оребрением.

Разработана методика и программа расчета оптимальных геометрических характеристик поперечного оребрения плоско-овальных труб, учитывающая режимные параметры работы теплообменной поверхности.

Полученные в работе экспериментальные данные, обобщающие зависимости для расчета конвективного теплообмена и аэродинамического сопротивления однорядных систем из плоско-овальных труб с неполным оребрением и подтвержденные эмпирические зависимости для расчета коэффициента эффективности ребра, а также рекомендации по выбору оптимальных геометрических характеристик оребрения плоско-овальных труб, могут быть применены при проектировании и изготовлении новых высокоэффективных теплообменных устройств.

Ключевые слова: плоско-овальная труба, ребро, теплообмен, аэродинамика, характеристики течения, термоанемометрия, локальные характеристики, эффективность, оптимизация.

ANNOTATION

Semenyako A.V. Regularities of transfer processes in heat-transfer surfaces from flat-oval tubes with transverse fins. – The manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.14.06 – technical thermal physics and industrial heat-power engineering. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” MES of Ukraine, Kiev, 2018.

The dissertation is devoted to solving the actual task of the development and substantiation of scientific principles of creating effective heat exchangers from single-row systems of flat-oval finned tubes, obtained on the basis of study of the surface-averaged and local characteristics of transfer processes and determination of optimal geometric characteristics of fining.

Comprehensive experimental and CFD-studies of surface-averaged and local heat transfer, aerodynamic resistance, flow characteristics and its structure were carried out with a flow of gas coolant through flat-oval tubes in the range of values of their geometrical and regime characteristics, relevant for heat-exchange equipment.

Obtained are the generalized similarity equations for the calculation of the intensity of convective heat transfer and aerodynamic resistance of single-row heat exchange systems from finned flat-oval tubes, which take into account the dependence of the degree at Reynolds number from the geometric characteristics.

The presented results of pressure distribution and local heat transfer coefficients, visualization, thermoanemometric and CFD-studies, on the basis of which the particularities of transport mechanisms are generalized in the form of a physical model of flow and heat transfer on the surface of finned flat-oval tubes.

A methodology and program for calculating the optimal geometric characteristics of the transverse finning of flat-oval tubes, which takes into account the regime parameters of the heat-exchange surface, is developed.

Keywords: flat-oval tube, fin, heat transfer, aerodynamics, flow characteristics, thermoanemometry, local characteristics, efficiency, optimization.

Підписано до друку 25.06.18р. Формат 60x90¹/16
Ум. друк. арк. 0,9. Обл-вид. арк 0,9
Наклад 100 прим. Замовлення № 416
Віддруковано на різнографі в видавничому центрі “Принт-центр”
04053, м. Київ, вул. Січових Стрільців, 26А
Тел./факс: 486-50-88, 332-41-10, 277-40-16
<http://www.printc.com.ua>. E-mail printcentr@ukr.net