

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

ВОЗНЮК МАКСИМ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 536.24:533.6.011

**ТЕПЛООБМІН ПЛОСКООВАЛЬНИХ ТРУБ
З НЕПОВНИМ ОРЕБРЕННЯМ В УМОВАХ
ПРИРОДНОЇ КОНВЕКЦІЇ І ПРИРОДНОЇ ТЯГИ**

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Київ – 2021

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

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Клименко Віктор Миколайович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
завідувач відділу теплофізичних проблем систем
теплопостачання

доктор технічних наук, доцент
Дорошенко Катерина Вікторівна,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри авіаційних двигунів

Захист дисертації відбудеться 22 квітня 2021 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 „___” березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В. І. Коньшин

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Впровадження нових видів оребрених поверхонь в енергомашинобудуванні та енергетиці дозволяє досягти значного заощадження паливно-енергетичних та матеріальних ресурсів. Доля таких поверхонь у складі енергетичного обладнання значна і постійно зростає: це водяні економайзери, калорифери котельних установок, котли-утилізатори, регенератори, мастилоохолоджувачі парогазових і газотурбінних установок, а також сухі градирні та повітряні конденсатори. Особливо слід відмітити сталу тенденцію відмови від градирень та інших систем охолодження випаровувального типу, в яких втрачається до 60% води та переходу до повітряних систем охолодження.

При повітряному охолодженні для відводу теплоти в навколишнє середовище застосовуються рекуперативні апарати повітряного охолодження (АПО) у яких рух повітря через поверхню теплообміну забезпечується за допомогою високопродуктивних осьових вентиляторів, що супроводжується значними витратами електричної енергії на їх привід. Одним з технічних рішень для енергозбереження при експлуатації АПО є переведення їх роботи протягом деякого періоду року в безвентиляторний режим з відключенням всіх вентиляторів. Відведення теплоти від робочого тіла при такому режимі роботи здійснюється в умовах вільної конвекції або природної тяги. Дослідження переводу АПО на відведення теплоти природною конвекцією підтверджують зниження витрат електроенергії на привід вентиляторів АПО з в середньому на 37% в рік.

Умови вільної конвекції та природної тяги спостерігаються у численних типах теплообмінних пристроїв – сухих градирнях, повітряних конденсаторах, елементах систем опалення і вентиляції, утилізаторах теплоти відхідних димових газів котельних агрегатів, що працюють за відсутності димососу. Створення таких теплообмінних апаратів з масогабаритними характеристиками та вартістю, прийнятними для їх широкого розповсюдження напряму пов'язане з теплоаеродинамічною ефективністю їх поверхні теплообміну. В якості таких поверхонь доцільно застосувати нові, запропоновані в КПІ ім. Ігоря Сікорського поверхні з плоскоовальних труб з неповним оребренням, які мають низку значних переваг порівняно з поверхнями із оребрених труб, що застосовуються у теперішній час у промисловості. Проте в доступній літературі не приведено даних щодо дослідження тепловіддачі плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах вільної конвекції та природної тяги.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки «Енергетика і енергоефективність» (Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки: Закон України від 11.06.2001 р. № 2623-III. Дата оновлення: 16.01.2016. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2623-14> (дата звернення: 27.03.2020) і тісно пов'язана з дослідженням та розробкою високоефективних теплообмінних поверхонь на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням для апаратів повітряного охолодження. Окремі розділи даної дисертації входили до складу науково-дослідницьких програм та тем, що проводяться на кафедрі АЕС і ІТФ КПІ ім. Ігоря Сікорського, прикладної держбюджетної науково-дослідної роботи

№2726-п «Розробка енергетичних і промислових систем охолодження з природною тягою на новій елементній основі» (номер державної реєстрації 0114U000561), яка виконувалась за тематичним планом науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності та зниження металоємності рекуперативних теплообмінних апаратів, що працюють в умовах вільної конвекції та природної тяги шляхом дослідження теплоаеродинамічних характеристик плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах вільної конвекції та природної тяги і створення інженерної методики їх розрахунку.

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

1. Провести експериментальне дослідження зовнішнього теплообміну поодинокі плоскоовальної труби з неповним оребренням в умовах вільної конвекції;

2. Дослідити вплив геометричних параметрів оребрення на інтенсивність зовнішнього теплообміну поодинокі плоскоовальної труби з неповним оребренням в умовах вільної конвекції за допомогою CFD-моделювання;

3. Провести експериментальне дослідження зовнішнього теплообміну пакетів плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах вільної конвекції та природної тяги;

4. Дослідити вплив режимних та крокових характеристик на інтенсивність зовнішнього теплообміну і аеродинамічний опір шахових пакетів плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної тяги;

5. Виконати оцінку та порівняння масогабаритних, теплоаеродинамічних та економічних показників апарату повітряного охолодження, працюючого в умовах вільної тяги, виконаного на базі різних типів оребрених труб;

6. На основі проведених досліджень розробити методику конструкторського розрахунку теплообмінних апаратів на базі пакетів плоскоовальних труб з неповним оребренням, що працюють в умовах природної тяги.

Об'єкт дослідження – теплоаеродинамічні процеси в пакетах плоскоовальних труб з неповним оребренням, що працюють в умовах вільної конвекції та природної тяги.

Предмет дослідження – вплив режимних та конструктивних параметрів на структуру течії, закономірності конвективного теплообміну та аеродинамічного опору при роботі плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах вільної конвекції та природної тяги.

Методи дослідження. Дослідження процесів теплообміну та візуалізація течії плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної конвекції та природної тяги виконувалося за допомогою стенду баштового типу та методів чисельного моделювання. Дослідження процесів теплообміну та аеродинамічного опору плоскоовальних труб з неповним оребренням при швидкостях потоку, що відповідають швидкостям, характерним для умов природної тяги, виконувалося в аеродинамічній трубі незамкненого типу. Коефіцієнти теплообміну визначались за результатами виміру розподілів температур на поверхні оребреної труби. Аеродинамічний опір визначався за результатами вимірювань перепаду тисків.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше виконано експериментальне дослідження та CFD-моделювання закономірностей теплообміну поодинокій плоскоовальній труби з неповним оребренням в умовах вільної конвекції;

2. Вперше запропоновано узагальнюючі розрахункові залежності для визначення коефіцієнтів зовнішньої тепловіддачі поодинокій плоскоовальній труби в умовах вільної конвекції в практичному інтервалі зміні її основних геометричних характеристик;

3. Виконані експериментальні дослідження впливу переходу від умов природної конвекції до умов природної тяги на закономірності теплообміну одно- та двоярядних пакетів плоскоовальних труб з неповним оребренням;

4. Вперше досліджено особливості обтікання плоскоовальних труб з неповним оребренням і вплив структури течії на інтенсивність їх тепловіддачі за допомогою експериментальних досліджень та CFD-моделювання в умовах вільної конвекції та природної тяги;

5. Досліджено вплив геометричних характеристик пакетів плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної тяги на їх зовнішній теплообмін та аеродинамічний опір та виявлено зміну режиму течії при омиванні пакетів труб при $Re_{ai} \approx 3000$;

6. Вперше запропоновані узагальнюючі розрахункові залежності для визначення коефіцієнтів зовнішньої тепловіддачі і аеродинамічного опору пакетів плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної тяги.

Матеріал дисертації розширює та поглиблює наукові знання про теплові та аеродинамічні процеси в пакетах плоскоовальних труб з неповним оребренням.

Практичні значення одержаних результатів. Створені інженерні методики розрахунку теплообміну та аеродинамічного опору поверхонь у вигляді пакетів плоскоовальних труб з неповним оребренням для умов природної тяги. Доведено, що використання плоскоовальних труб з неповним оребренням в конструкціях апаратів повітряного охолодження, що працюють в умовах природної тяги підвищує їх теплову ефективність на 15-20 % та знижує їх вартість на 25-30%.

Матеріали дисертаційної роботи застосовуються в навчальному процесі при підготовці студентів теплоенергетичного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування освітньої програми «Інженерія і комп'ютерні технології теплоенергетичних систем» та 144 Теплоенергетика освітньої програми «Теплові електричні станції».

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, приведені у дисертаційній роботі, отримані особисто автором, у тому числі: результати експериментальних досліджень, узагальнені залежності для розрахунку коефіцієнтів теплообміну поодиноких плоскоовальних труб з неповним оребренням; узагальнені залежності для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі та аеродинамічного опору пакетів плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах вільної тяги, результати числового моделювання динаміки обтікання плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах вільної конвекції та вільної тяги, результати техніко-економічного порівняння апарату повітряного охолодження, працюючого в умовах вільної тяги, нові інженерні методики розрахунків теплообміну і аеродинамічного

опору пакетів плоскоовальних труб з неповним оребрением для рекуперативних теплообмінних апаратів повітряного охолодження. В опублікованих у співавторстві роботах здобувачеві належать: основні результати досліджень теплообміну та аеродинамічного опору пакетів плоскоовальних труб з неповним оребрением в умовах вільної конвекції та природної тяги, обробка експериментальних даних, аналіз отриманих результатів та розробка методик теплових і аеродинамічних розрахунків.

Апробація результатів дисертації. Результати та основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на XIII міжнародній конференції „Проблеми екології и експлуатації об'єктів енергетики” (м. Ялта, 4 – 8 червня 2013 р.); XII Міжнародній науково-практичній конференції аспірантів, магістрантів і студентів „Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики”(м. Київ, Україна 22 - 25 квітня 2014 р.); VI Російській національній конференції по тепломасообміну „РНКТ-6” (м. Москва, Росія 27 - 31 жовтня 2014 р.); XIV міжнародній конференції „Проблеми екології и експлуатації об'єктів енергетики” (м. Київ, 4 – 5 грудня 2014 р.); XIII Міжнародній науково-практичній конференції аспірантів, магістрантів і студентів „Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики”(м. Київ, Україна 21 - 24 квітня 2015 р.); XV Мінському міжнародному форумі по тепломасообміну (м. Мінськ, Білорусь, 23 – 26.травня.2016 р.)

Публікації. Згідно з темою дисертації, за результатами досліджень опубліковано 26 наукових праць, у тому числі 5 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданні, включеному до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України; 4 статті у наукових фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 9 патентів України на корисну модель, 6 тез доповідей та матеріалів конференцій, 6 статей в інших виданнях

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел з 110 найменувань та 1 додатку. Загальний обсяг роботи складає 194 сторінки, з них 80 рисунків та 18 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 огляд робіт, присвячених теплообмінним апаратам, що працюють в умовах вільної конвекції та природної тяги та галузям їх застосування, експериментальному дослідженню процесів вільної конвекції та природної тяги у пучках труб, методам інтенсифікації вільноконвективного теплообміну.

В переважній більшості теплообмінних апаратів, що працюють в умовах вільної конвекції та природної тяги застосовуються, як правило, біметалеві оребрені труби круглого профілю. Велика кількість робіт (В. Б. Кунтиш, А. Б. Сухоцький, А. В. Самородов, А. В. Позднякова, Т. Tsuibouchi, A. Nicol, В. І. Володин, Г. С. Маршалова, О. О. Мільман та ін.) присвячена дослідженню інтенсивності

теплообміну саме ребристих труб круглого профілю в умовах вільної конвекції та природної тяги. Пошук альтернативної поверхні теплообміну для її використання в теплообмінних апаратах, що працюють в умовах вільної конвекції та природної тяги є дуже важливою задачею, оскільки зменшення аеродинамічного опору теплообмінної поверхні, а також її габаритів призведе до великого зниження капітальних витрат на виготовлення таких теплообмінних апаратів. У якості нової поверхні теплообміну пропонується використати розроблені в КПІ ім. Ігоря Сікорського плоскоовальні труби з неповним оребренням. Дослідження аеродинаміки та теплообміну таких труб в умовах вимушеної конвекції (Є. М. Письменний, П. І. Багрій, О. М. Терех, О.В. Семеняко) показують доцільність подальших досліджень таких труб в умовах природної конвекції та природної тяги.

Дотепер відсутні системні дослідження теплоаеродинамічних характеристик плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах вільної конвекції та природної тяги. Не визначено вплив геометричних і режимних характеристик на інтенсивність теплообміну та аеродинамічного опору плоскоовальних труб з неповним оребренням при їх роботі в умовах природної конвекції та природної тяги. На даний момент не розроблені методики конструкторського розрахунку апаратів на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням, що працюють в умовах природної тяги.

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

У **другому розділі** приведено: опис експериментальних установок, геометричних характеристик досліджених плоскоовальних труб з неповним оребренням (рис. 1) та їх пакетів, методики досліджень та обробки даних з конвективного теплообміну, аеродинамічного опору, структури течії, CFD-моделювання та методику визначення похибки прямих та непрямих вимірювань.

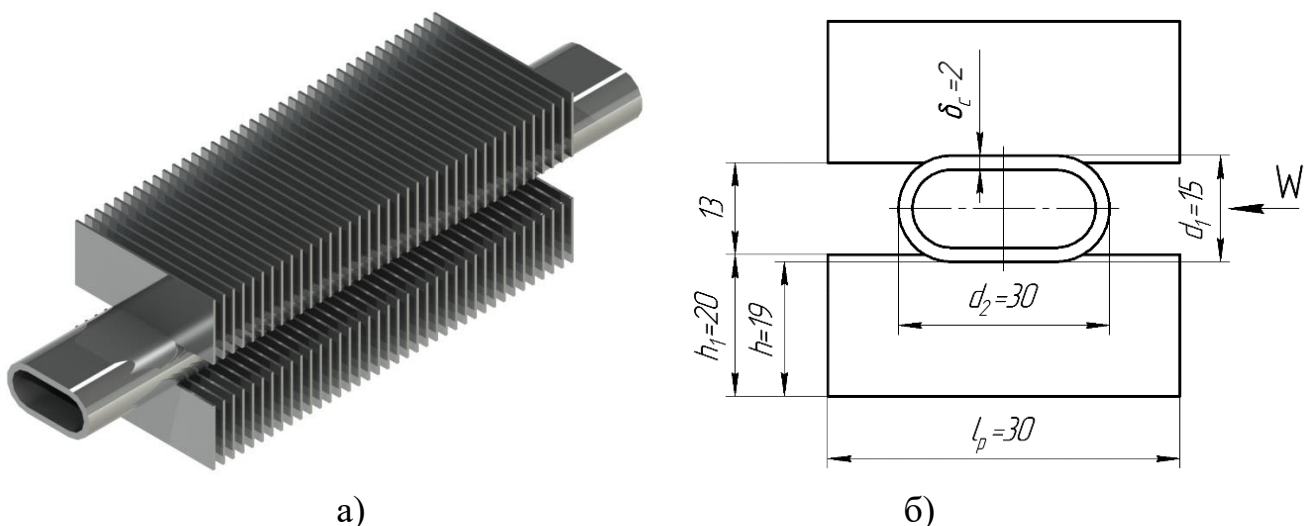


Рис. 1 – Загальний вигляд (а) та геометричні характеристики (б) труб

Дослідження інтенсивності конвективного теплообміну плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної конвекції і природної тяги проводились на експериментальному стенді, який представляв собою баштову конструкцію, що

складалася з теплообмінної секції квадратного перерізу, в якій розташовувалися горизонтальні труби довжиною 480 мм і витяжної башти. За своєю конструкцією стенд дозволяв проводити дослідження теплообміну пакетів в умовах як вільної конвекції (без витяжної башти, рис. 2, а), так і природної тяги (зі встановленою витяжною баштою, рис. 2, б). Дослідження проводились в діапазоні зміни чисел Релея $Ra=(4 - 30)$ для поодинокі труби, однорядного пакету та дворядних шахового та коридорного пакетів, крокові характеристики яких лишались незмінними та становили $S_1=S_2=60\text{мм}$.



а – для досліджень в умовах вільної конвекції; б – для досліджень в умовах природної тяги

Рис.2 – Експериментальний стенд для дослідження теплообміну в умовах вільної конвекції та природної тяги

В експериментальних дослідженнях теплообміну пакетів труб на стенді баштового типу використовувався метод повного теплового моделювання для створення робочого теплового процесу, аналогічного тому, який відбувається у реальному теплообмінному апараті.

Для вимірювання характеристик потоку (локальних швидкостей та температур) при проведенні досліджень в умовах природної тяги використовувався анемометр-термометр Testo 425. Чутливим елементом такого датчика є тонка вольфрамова нитка діаметром $d = 10$ мкм, що вноситься у потік за допомогою телескопічного щупу. Вимірювання полів температур та швидкостей повітря над пакетом труб здійснювалося над трубним пакетом поперек труб в середній частині секції

Дослідження конвективного теплообміну і аеродинамічного опору пакетів оребрених труб при малих швидкостях потоку (від 0,5 до 3 м/с), які відповідають умовам природної тяги в сухих системах охолодження, проводилися на дослідній установці, що представляє собою аеродинамічну трубу розімкненого типу з прямокутним перерізом розмірами 72x414 мм. Проточна частина дослідного стенду складалася з робочої ділянки з плавнопрофільованими вставками і двох заспокоюючих ділянок довжиною 950 мм, які призначені для формування полів швидкостей і вирівнювання статичного тиску. Для забезпечення необхідних діапазонів швидкостей в робочій ділянці використовувались змінні вхідні сопла

діаметром 75 і 42 мм. Досліджувані труби (рис. 1) висотою 71 мм розташовувалися в робочій ділянці експериментальної установки з шаховим компонуванням.

Для вимірювання температурного поля ребра і стінки труби використовувалася труба-калориметр з електричним нагрівачем всередині, що складалася з двох частин, які щільно з'єднувалися між собою за допомогою спеціального клею. У стінку несучої труби і в канали на ребрі верхньої половини труби-калориметра зачеканювалися сімнадцять мідь-константових термопар. У процесі проведення експериментів визначалися конвективні α_k і приведені α_{np} коефіцієнти тепловіддачі за співвідношеннями:

$$\alpha_k = \frac{Q}{H_k (\bar{T}_{cp} - \bar{T}_n)}; \quad (1)$$

$$\alpha_{np} = \frac{Q}{H_k (\bar{T}_{cm} - \bar{T}_n)}. \quad (2)$$

Коефіцієнт дійсної ефективності ребра E_δ розраховувався за відомим співвідношенням для прямого прямокутного ребра:

$$\alpha_{np} = \alpha_k \cdot \left(\frac{H_p}{H_k} \cdot E_\delta + \frac{H'_{2l}}{H_k} \right) \Rightarrow E_\delta = \left(\frac{\alpha_{np}}{\alpha_k} - \frac{H'_{2l}}{H_k} \right) \cdot \frac{H_k}{H_p}. \quad (3)$$

Аеродинамічний опір досліджених пучків профільованих оребрених труб вивчався в умовах ізотермічної течії при температурі повітря $t_{ex}=(15 - 20)^\circ\text{C}$. Втрати тиску визначалися за різницею статичних тисків до і після пучка з урахуванням втрат на тертя та місцевих опорів у проточній частині стенда.

Обробка експериментальних даних та їх представлення проводилась в числах подібності Nu , Eu , Re , Ra , в яких за визначальний розмір приймався поперечний діаметр труби d_1 .

При експериментальному дослідженні теплообміну та структури течії в пакетах плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної тяги на стенді баштового типу відносна похибка визначення коефіцієнта тепловіддачі і відповідного числа Nu складала $\pm (2,34 - 2,48)\%$. Похибка визначення числа Ra не перевищувала $\pm 1,55\%$.

Для експериментів з дослідження теплообміну і аеродинамічного опору шахових пучків плоскоовальних труб з неповним оребренням при малих швидкостях омивання, відносна похибка визначення коефіцієнта тепловіддачі і відповідного числа Nu складала $\pm (2,5 - 4,3)\%$. Похибка визначення числа Re для двох режимів не перевищує $\pm 5,03\%$. Відносна похибка визначення числа Eu лежить у межах $\pm (2,74 - 13,47) \%$.

Для дослідження розподілу температур, полів осередненої швидкості та структури течії плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної тяги за допомогою CFD моделювання, була розроблена скінчено-елементна модель ряду дослідних труб.

При чисельному моделюванні використовувався підхід Буссінеска. При використанні цього підходу вважають, що фізичні параметри середовища постійні, густина залежить тільки від температури і цю залежність необхідно враховувати тільки у виразі для сили тяжіння. Розрахунки проводились в стаціонарній постановці. Геометрія CFD-моделей базувалася на повній тривимірній моделі плоскоовальних труб з неповним оребренням та відповідає проведенням фізичним експериментам. Поставлена задача була зовнішньою, розрахунки проводились в стаціонарній постановці. Під час моделювання в трубах розглядалося середнє по ширині труби ребро, обмежене однотипними ребрами, які були вибрані в якості охоронних.

Взаємний вплив пограничних шарів, що розвиваються на поверхнях ребер, які утворюють плоский напіввідкритий канал, враховувався симетричними граничними умовами. Розрахункова область покривалася нерівномірною, зі згущенням до стінок основи і ребер елементів нагріву, прямокутною сіткою. В якості граничних умов задавалися температура зовнішнього середовища та густина теплового потоку на внутрішніх поверхнях плоскоовальних труб. Згадані величини співпадали з вхідними даними фізичного експерименту.

У **третьому розділі** представлені результати експериментального дослідження та комп'ютерного моделювання закономірностей теплообміну поодинокі плоскоовальної труби з неповним оребренням при варіюванні її геометричних характеристик в умовах вільної конвекції.

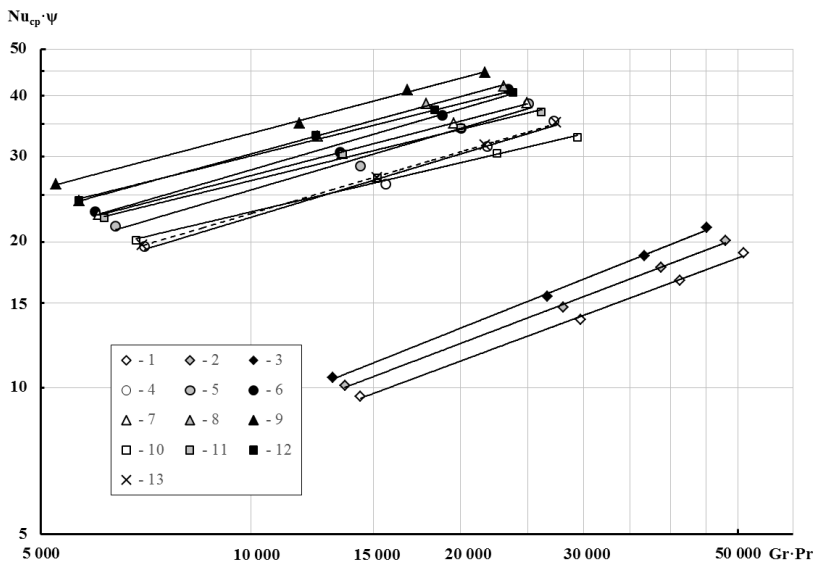
Першим етапом було виконано експериментальне дослідження теплообміну поодинокі плоскоовальної труби в умовах вільної конвекції з фіксованими геометричними характеристиками, що пов'язане з існуючими обмеженнями, накладеними технологією виготовлення даних труб. Для дослідження впливу геометричних характеристик плоскоовальної труби з неповним оребренням на закономірності процесів теплообміну було виконане CFD моделювання ряду плоскоовальних труб з неповним оребренням. З метою зменшення кількості досліджуваних геометричних параметрів та з огляду на можливість технологічного виготовлення оребрених труб було прийняте рішення про варіювання лише двох найбільш впливових на теплообмін характеристик оребрення – висоти ребра h_p та кроку між ребрами t .

З метою верифікації розрахункової моделі було виконане числове моделювання теплообміну труби, геометричні характеристики якої відповідають проведеному експерименту. Максимальна абсолютна похибка CFD моделювання склала $1,35\text{ }^\circ\text{C}$, а відносна – $2,19\%$, що свідчить про достатню точність розробленої моделі.

Дослідження теплообміну поодиноких плоскоовальних труб з неповним поперечним оребренням, проводились в області змін чисел Релея $Ra = Gr_{d_1} \cdot Pr = 5 \cdot 10^3 \dots 5,1 \cdot 10^4$. Результати цих досліджень свідчать, що дослідні дані достатньо добре узагальнюються степеневою залежністю виду:

$$\overline{Nu} = C_q \cdot (Gr_{d_1} \cdot Pr)^m \cdot \psi^{-1} \quad (4)$$

Результати дослідження середньої тепловіддачі поодиноких плоскоовальних труб з неповним оребренням приведені на рис 3.



1–12 – номери досліджуваних труб;
13 – результати експериментального дослідження
Рис. 3 – Результати дослідження середньої тепловіддачі поодиноких плоскоовальних труб з неповним оребренням

приведе до зменшення загального теплового потоку, що передається оребреною трубою.

При цьому, збільшення висоти ребер призводить до менш вираженого зменшення інтенсивності тепловіддачі. Враховуючи достатньо високі коефіцієнти ефективності сталевих ребер в досліджуваних випадках ($E_p = 0,91...0,99$) можна зробити висновок про допустимість використання ребер з висотою h_p до 30 мм. Подальше збільшення висоти ребра не є доцільним з точки зору матеріалоемності теплообмінної поверхні та обмежується технологією виготовлення плоскоовальних труб з неповним оребренням.

При математичній обробці експериментальних даних була виявлена закономірність зміни коефіцієнта C_q та значення показника степені m в залежності (4) від геометричних параметрів оребреної труби (рис. 4.) У якості безрозмірного геометричного параметру, що характеризує геометрію оребреної труби, у багатьох роботах для узагальнення експериментальних даних з теплообміну оребрених труб традиційно використовується коефіцієнт оребрення труби ψ . Проте, регресійний аналіз даних свідчить про те, що у випадку, що розглядається, показник степені m в формулі (4) значною мірою залежить від співвідношення кроку між ребрами t до поперечного розміру труби d_1 , та слабо залежить від зміни висоти ребра h_p (Рис. 4). Отже після проведеного аналізу було прийняте рішення про використання у якості узагальнюючого параметру для узагальнення експериментальних даних з теплообміну комплексу t/d_1 .

При розгляді отриманих даних було виявлено, що зі збільшенням кроку між ребрами t спостерігається збільшення інтенсивності тепловіддачі. При цьому значне зростання спостерігається при збільшенні кроку з 2 до 4 мм, та з 4 до 6 мм. При збільшенні кроку ребер з 6 до 8 мм тенденція зростання інтенсивності тепловіддачі значно зменшується. Це свідчить про те, що подальше збільшення кроку оребрення не призведе до зростання інтенсивності тепловіддачі. Крім того, суттєве зменшення площі теплообмінної поверхні, що відбувається при цьому,

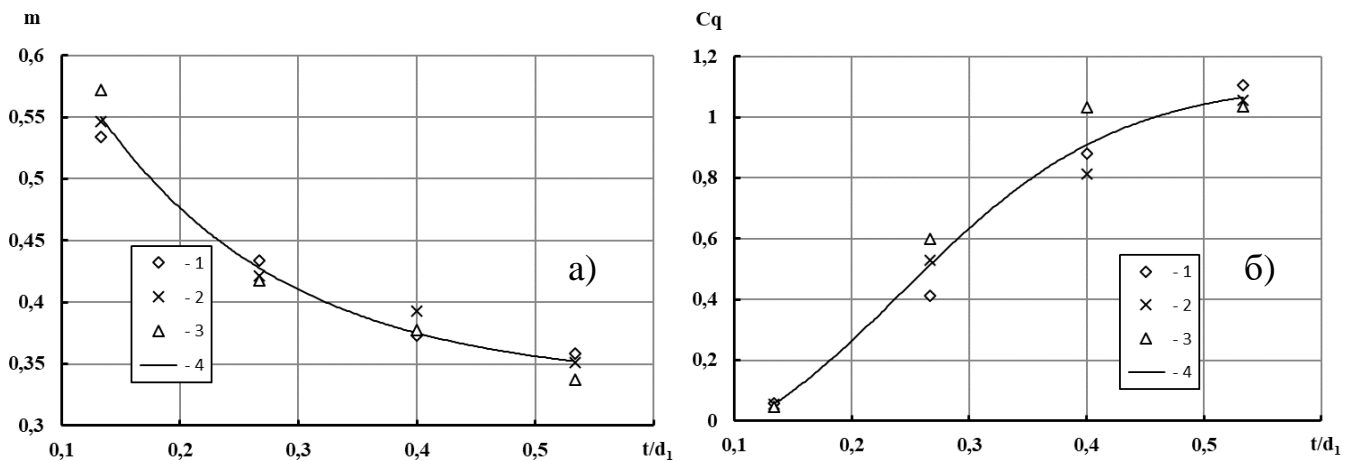


Рис. 4 – Залежність показника степені m (а) та коефіцієнта C_q (б) в формулі (4) від комплексу t/d_1

Варто відмітити, що при великих значеннях кроку між ребрами t показник степені m наближається до значень, характерних для вільноконвективного теплообміну неоребраних гладких труб (показник степені $\sim 0,25$) а при малих – до значень, характерних для течії в системі каналів (показник степені $\sim 0,6...0,7$). Це свідчить про зміну режиму вільноконвективної течії в залежності від зміни геометричних параметрів плоскоовальної труби з неповним оребренням.

Узагальнююча залежність для розрахунку інтенсивності теплообміну поодинокій плоскоовальній труб з неповним оребренням в умовах вільної конвекції має вигляд:

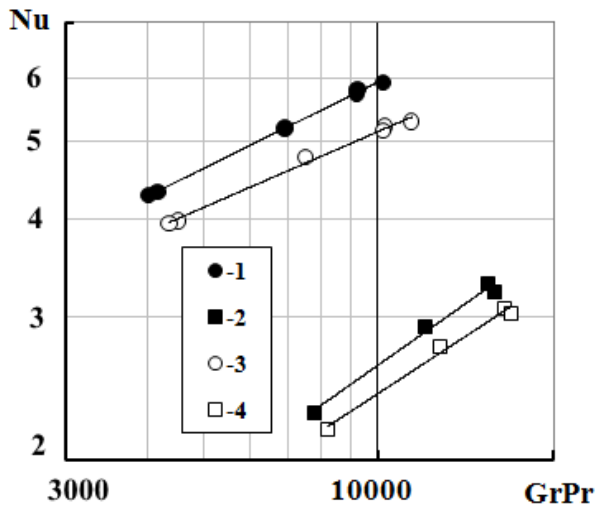
$$\overline{Nu} = \left[\frac{1,386}{1 + \exp\left(\frac{0,244 - t/d_1}{0,091}\right)} - 0,264 \right] \cdot \left(Gr_{d_1} \cdot Pr \right)^{\left[0,334 + \frac{45,9}{1 + \exp\left(\frac{t/d_1 - 0,071}{0,158}\right)} \right]} \cdot \psi^{-1}. \quad (5)$$

Залежність справедлива за умов $h_p = 20...30$ мм; $t = 2...8$ мм, в діапазоні чисел Релея $Ra = Gr_{d_1} \cdot Pr = 5 \cdot 10^3...5,1 \cdot 10^4$, похибка узагальнюючого рівняння не перевищує $\pm 17\%$.

У четвертому розділі представлені результати дослідження теплообміну та аеродинамічного опору пакетів плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах вільної конвекції та природної тяги. Проведені експериментальні дослідження теплообміну однорядного та дворядних шахового і коридорного пакетів плоскоовальних труб з неповним поперечним оребренням в умовах вільної конвекції і природної тяги в діапазоні чисел Релея $3000 < Ra < 30000$. Результати цих досліджень свідчать, що дослідні дані достатньо добре узагальнюються степеневою залежністю виду:

$$Nu = C_q \cdot (Gr_{d_1} \cdot Pr)^m. \quad (6)$$

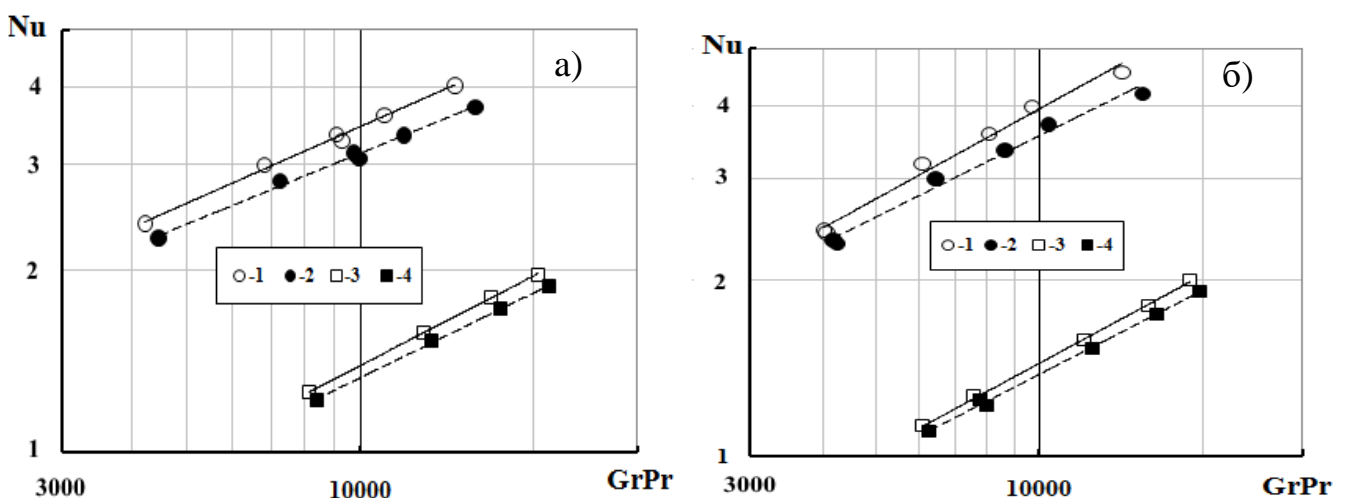
Результати дослідження тепловіддачі однорядного пакету приведені на рис. 5 свідчать що перехід з умов вільної конвекції (без витяжної башти, рис. 2, а) до умов природної тяги (зі встановленою витяжною баштою, рис. 2, б), призводить до збільшення інтенсивності теплообміну на 70-75%.



1 – природна тяга, середній;
 2 – вільна конвекція, середній;
 3 – природна тяга, приведений;
 4 – вільна конвекція, приведений.
 Рис. 5 – Дослідження тепловіддачі однорядного пакету(б)

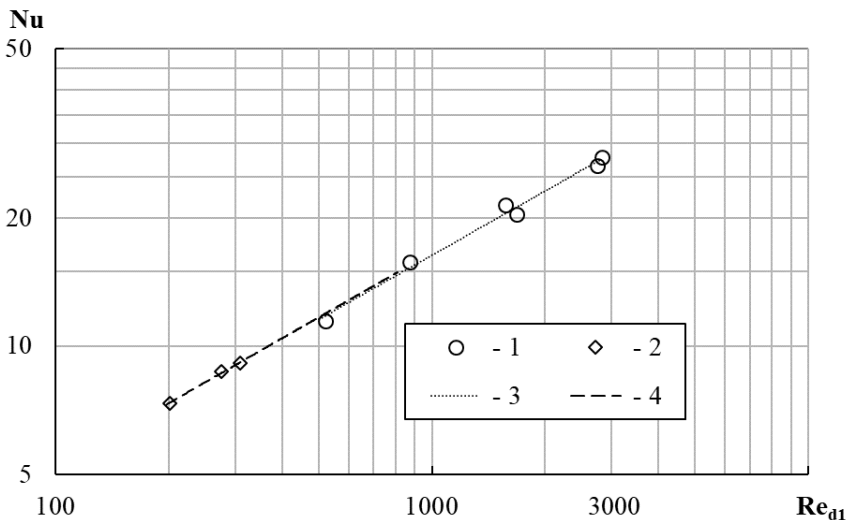
На рис. 6 представлено результати дослідження теплообміну дворядних шахового та коридорного пакетів. При порівнянні середнього теплообміну цих пакетів в умовах природної тяги та в умовах вільної конвекції виявлено, що середня тепловіддача коридорного пучка в умовах природної тяги є в 2 рази більшою ніж в умовах вільної конвекції, а для шахового пучка - в 1,8 разів. За результатами порівняння середнього теплообміну дворядного шахового і дворядного коридорного пакетів виявлено, що інтенсивність тепловіддачі шахового та коридорного пучків в умовах вільної конвекції є практично однаковою. При переході до умов природної тяги в області низьких значень чисел Релея $Ra=(4\div 4,5)\cdot 10^3$ інтенсивність тепловіддачі шахового та коридорного пучків також є

практично однаковою. Але в області більш високих значень чисел Релея $Ra=(9\div 14)\cdot 10^3$ інтенсивність тепловіддачі шахового пучка є на 8-13% вищою ніж коридорного.



1 – природна тяга, середній; 2 – вільна конвекція, середній;
 3 – природна тяга, приведений; 4 – вільна конвекція, приведений.
 Рис. 6 – Дослідження тепловіддачі коридорного (а) та шахового пакету(б)

Для забезпечення режимних умов, які відповідають умовам стійкої природної тяги необхідно проводити встановлення над теплообмінним апаратом витяжної башти (рис. 2, б), тому було прийняте рішення провести відповідні дослідження теплообміну та аеродинамічного опору пакетів плоскоовальних труб з неповним оребренням в аеродинамічній трубі розіркненого типу.



- 1 – дані досліджень в аеродинамічній трубі;
 2 – дані досліджень на баштовому стенді;
 3 – апроксимуюча крива досліджень в аеродинамічній трубі; 4 – апроксимуюча крива досліджень на баштовому стенді

Рис. 7 – Залежність чисел Нусельта від чисел Рейнольдса

можливість проведення дослідження теплообміну та аеродинамічного опору багаторядних пакетів труб в умовах, що відповідають умовам природної тяги в аеродинамічній трубі розіркненого типу.

Дослідження теплообміну шести шахових пакетів виконані в діапазоні чисел Рейнольдса від 500 до 20000, що відповідає швидкостям в живому перерізі пучка (0,5 – 20) м/с свідчать, що дослідні дані достатньо добре узагальнюються степеневою залежністю виду:

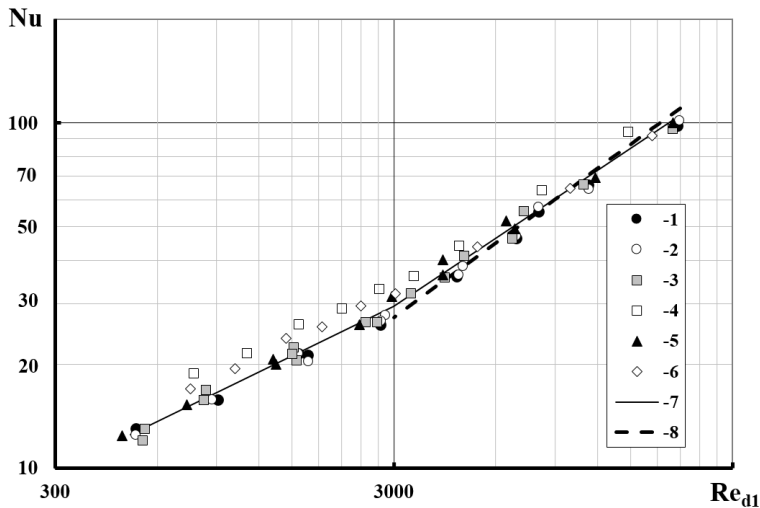
$$Nu_{d_1} = C_q \cdot Re_{d_1}^m \quad (7)$$

Результати цих досліджень подані на рис. 8, куди також нанесено криву 8, отриману П. І. Багрієм, який проводив дослідження конвективного теплообміну шахових пучків даних труб у діапазоні $3000 < Re_{d1} < 20000$.

Частина експериментальних даних на рис. 8 з невеликим розсіюванням в області $3000 < Re_{d1} < 20000$ групується біля кривої 7. Варто відмітити, що отримані дані в області $3000 < Re_{d1} < 20000$ задовільно узгоджуються з даними, отриманими П. І. Багрієм. Як видно, в області $Re_{d1} < 3000$ спостерігається інша закономірність теплообмінного процесу, який характеризується більш пологим нахилом кривої 7, тобто при $Re_{d1} \approx 3000$ настає очевидна зміна режиму течії при омиванні пакетів труб.

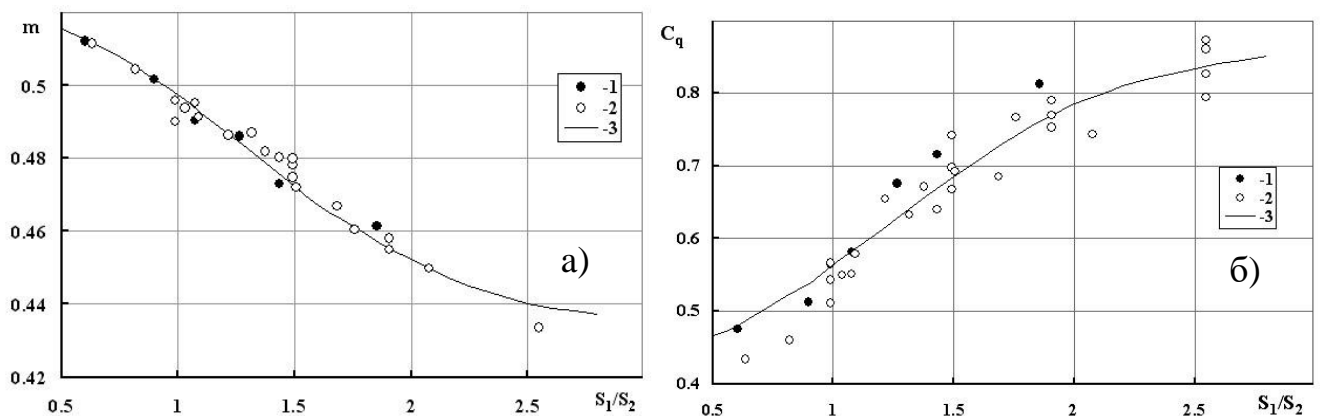
З метою перевірки правильності такого підходу було виконано тестовий експеримент в аеродинамічній трубі з дослідження інтенсивності теплообміну багаторядного шахового пакету, геометричні характеристики якого відповідали шаховому пакету, дослідженому на стенді баштового типу.

Результати порівняння експериментальних даних (рис. 7), отриманих на різних стендах свідчать про повну кореляцію даних, отриманих на двох варіантах дослідних стендів та дозволяють зробити висновок про



1 – 6 – дані експериментальних досліджень;
7 – осереднена крива; 8 – дані інших авторів
Рис. 8 – Залежність чисел Нуссельта від чисел Рейнольдса $500 < Re_{d1} < 20000$

З метою створення узагальнюючих співвідношень для розрахунку інтенсивності теплообміну в більш широкому інтервалі зміни геометричних характеристик труб та пучків, до аналізу додатково залучені експериментальні дані з теплообміну, отримані іншими дослідниками (рис. 9), екстрапольовані в область чисел $Re < 3000$.



1 - досліджені пучки; 2 - екстрапольовані дані в область $Re_{d1} < 3000$;
3 - розрахункова крива

Рис.9 – Залежність показника ступеня m (а) та коефіцієнта C_q (б) у формулі (7) від параметра розміщення S_1/S_2 в області $500 < Re_{d1} < 3000$

З урахуванням даних рис. 9 залежність 7 набуває вигляду:

$$Nu_{d_1} = -0,25 \cdot th \left(1,3 - \frac{S_1}{S_2} \right) + 0,65 \cdot Re_{d_1}^{0,05 \cdot th \left(1,3 - \frac{S_1}{S_2} \right) + 0,48} \quad (8)$$

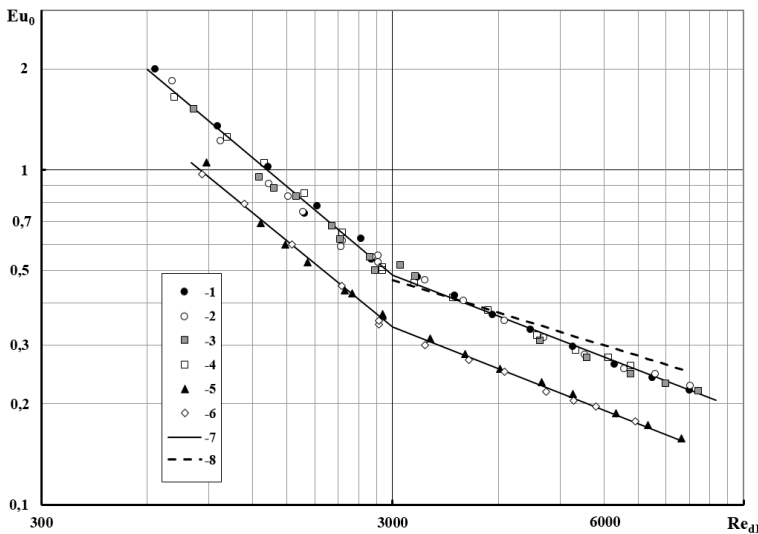
Залежність справедлива за умов $500 < Re_{d1} < 3000$; $5,3 < \psi < 21,5$ та від $0,6 < S_1/S_2 < 2,5$. Похибка розрахункової залежності (8) не перевищує $\pm 12\%$.

Крім того, в цій області має місце деяке розшарування даних. Пучок №4 з $S_1/S_2=1,266$ має найбільшу інтенсивність теплообміну, близьким за значенням до нього є пучок №6 з $S_1/S_2=1,855$. В міру зменшення параметра S_1/S_2 тепловіддача у пучках знижується. Значення Nu для пучків №№1 – 3 у межах експериментальної похибки практично співпадають між собою, а різниця за інтенсивністю теплообміну між пучками №№4, 6 та іншими у розглянутому діапазоні Re_{d1} складає 10 – 15 %.

Дослідження аеродинамічного опору 6 шахових пакетів виконані в діапазоні чисел Рейнольдса від 600 до 20000, що відповідає швидкостям в живому перерізі пучка (0,6 – 20) м/с свідчать, що дослідні дані достатньо добре узагальнюються степеневою залежністю виду:

$$Eu_0 = C_s \cdot Re_{d1}^{-n} \quad (9)$$

Результати цих досліджень подані на рис. 10, куди також нанесено криву 8, отриману П. І. Багрієм, який проводив дослідження аеродинамічного опору шахових пучків даних труб у діапазоні $3000 < Re_{d1} < 20000$. Отримані дослідні дані з аеро-



1 – 6 – дані експериментальних досліджень;
7 – осереднена крива; 8 – дані інших авторів
Рис. 10 – Залежність чисел Ейлера від чисел Рейнольдса $600 < Re_{d1} < 20000$

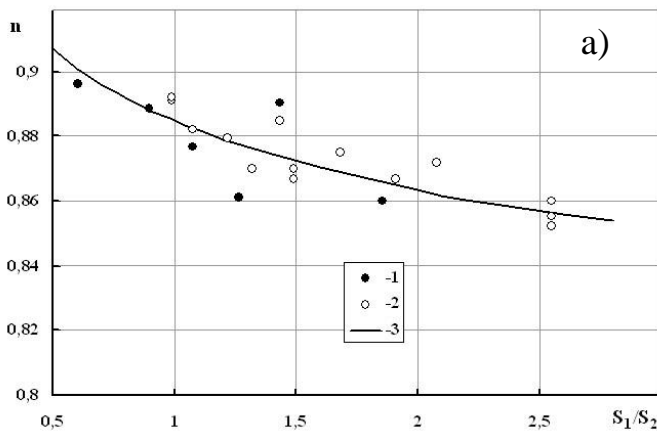
динамічного опору в області $3000 < Re_{d1} < 20000$ задовільно узгоджуються з даними, отриманими П. І. Багрієм. Як видно, в області $Re_{d1} < 3000$ осереднені криві дослідних значень чисел Ейлера мають більший кут нахилу, ніж криві в області $Re_{d1} > 3000$, що підтверджує зміну режиму течії при омиванні пакетів труб при $Re_{d1} \approx 3000$. Представлені на рис. 10 дані свідчать про їх розшарування за параметром розміщення S_1/S_2 . Для пакетів труб №№ 1-4, які мають відношення кроків S_1/S_2 0,6...1,266, розшарування даних набувають

мінімальних значень, а для $S_1/S_2 > 1,266$ - більших значень. Із зростанням S_1/S_2 від 0,6 до 1,855 числа Ейлера зменшуються на 35...40% в діапазоні чисел Рейнольдса $600 < Re_{d1} < 3000$.

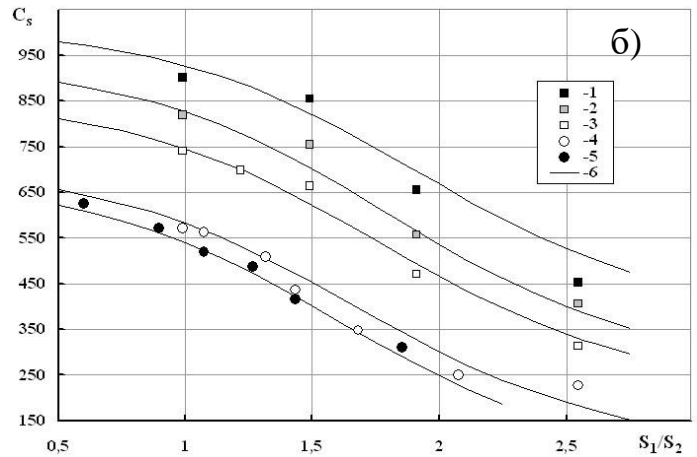
На рис. 11 представлені залежності показника степені n та коефіцієнта C_q в залежності від параметру розміщення труб S_1/S_2 , з залученням даних, отриманих іншими дослідниками та екстрапольованими в область низьких чисел Рейнольдса.

Показник степені n при числі Рейнольдса у формулі (9) зменшується із зростанням S_1/S_2 (рис. 11). Дослідами встановлено, що для досліджених типорозмірів пакетів і для екстрапольованих даних n не залежить від коефіцієнта оребрення ψ .

Коефіцієнт C_s суттєво зменшується із зростанням S_1/S_2 приблизно у 2 рази, як для досліджених пакетів труб, так і для екстрапольованих даних при однакових коефіцієнтах оребрення ψ (рис. 11). Залежність величин коефіцієнтів C_s від параметру S_1/S_2 підпорядковується закону „гіперболічного” тангенсу.



1 - досліджені пучки; 2 - екстрапольовані дані в область $Re_{dl} < 3000$;
3 - розрахункова крива



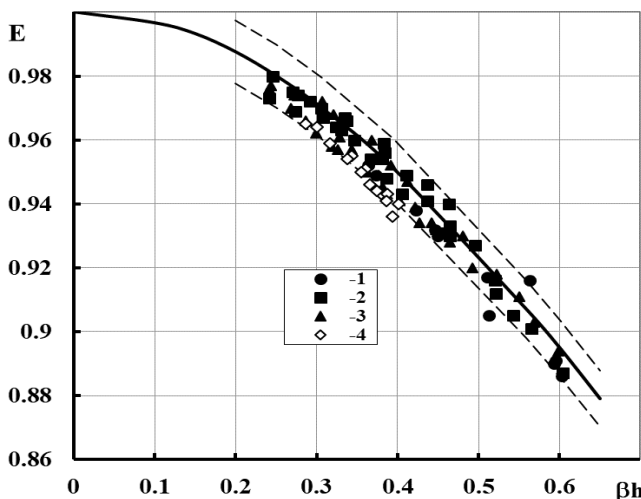
1–4 – екстрапольовані дані в область $Re_{dl} < 3000$, $\psi = 21,5$, $\psi = 18,47$, $\psi = 17,68$, $\psi = 15,16$, відповідно; 5 – досліджені пакети, $\psi = 14,24$; 6 – розрахункові криві

Рис. 11 – Залежність показника ступеня n (а) та коефіцієнта C_s (б) у формулі (9) від параметра розміщення S_1/S_2 в області $600 < Re_{dl} < 3000$

З урахуванням даних рис. 11 залежність (9) набуває вигляду:

$$Eu_0 = -320 \cdot th \left[\frac{S_1}{S_2} - (0,695 \cdot \ln(\psi) - 0,223) \right] + (810 \cdot \ln(\psi) - 1790) \cdot Re_{dl}^{-0,885} \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{-0,035} \quad (10)$$

Залежність справедлива за умов $600 < Re_{dl} < 3000$; $5,3 < \psi < 21,5$ та від $0,6 < S_1/S_2 < 2,5$. Похибка розрахункової залежності (10) не перевищує $\pm 20\%$.



1–4 дані експериментальних досліджень;
5 – існуюча розрахункова залежність (11–13)

Рис. 12 – Коефіцієнт ефективності ребра при роботі плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах вільної конвекції і природної тяги

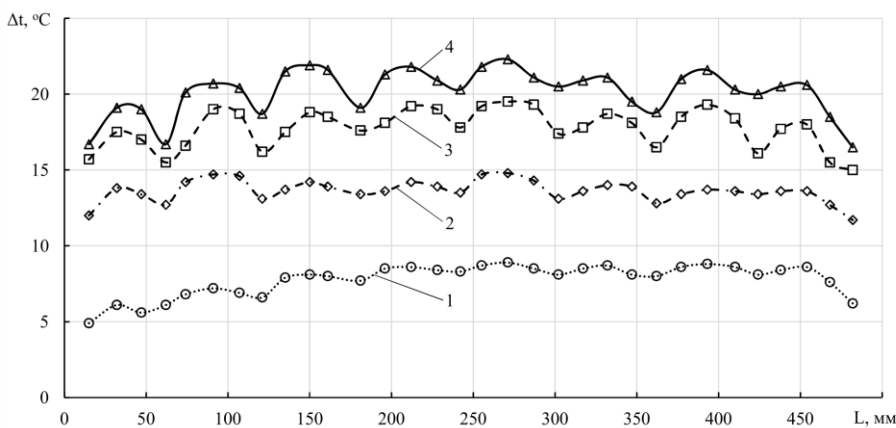
В рамках виконаної роботи було проведене порівняння експериментальних значень коефіцієнту ефективності ребра в умовах вільної конвекції і природної тяги (рис. 12) з відомими розрахунковими залежностями (11–12), де умовна висота ребра визначається за залежністю (13), отриманою Є. М. Письменним. Результати порівняння свідчать, що відмінність отриманих експериментальних даних від розрахункових формул (11–13) складає $\pm 2\%$, що свідчить про можливість їх використання для умов вільної конвекції, природної тяги та вимушеної конвекції.

$$E = \frac{th(\beta h_y)}{\beta h_y}, \quad (11)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{2\alpha_k}{\delta \cdot \lambda}}, \quad (12)$$

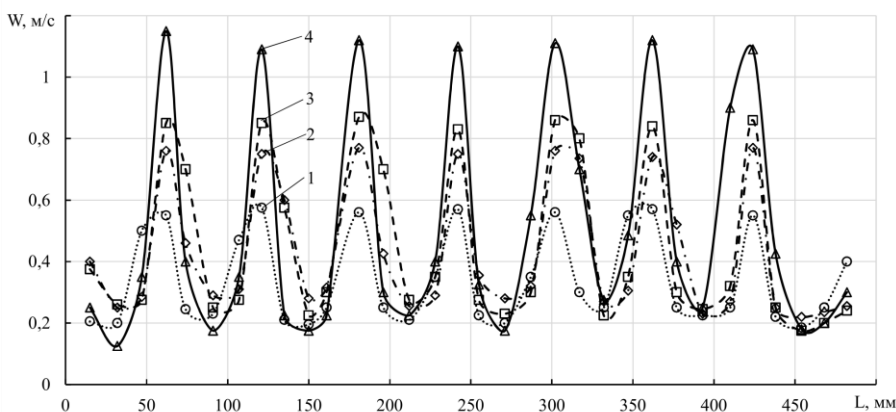
$$h_y = \left(h + \frac{\delta}{2} \right) \left[1 + b \cdot (1 + 2L_K) \cdot \ln \left(\frac{1}{L_K} \right) \right], \quad (13)$$

Зважаючи на високі значення коефіцієнту ефективності ребра при роботі плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах вільної конвекції та природної тяги, можна зробити висновок про доцільність подальшого розвитку висоти ребра до значень 25...30 мм (за умови виготовлення таких труб з вуглецевої сталі 08кп) для збільшення кількості теплоти, що відводиться з одиниці довжини такої оребреної труби.



1 – $Q=50$ Вт; 2 – $Q=100$ Вт; 3 – $Q=150$ Вт; 4 – $Q=175$ Вт

Рис. 13 – Розподіл температурного напору по ширині однорядного пакету за результатами експериментальних досліджень



1 – $Q=50$ Вт; 2 – $Q=100$ Вт; 3 – $Q=150$ Вт; 4 – $Q=175$ Вт

Рис. 14 – Розподіл швидкостей по ширині однорядного пакету за результатами експериментальних досліджень

рядного пакету плоскоовальних труб з неповним оребренням L . Представлені залежності носять характер хвилястої кривої з локальними екстремумами. Параметром, який розширює приведені дані, є теплове навантаження Q , підведене

П'ятий розділ описує результати експериментального та числового дослідження структури течії та полів осередненої швидкості в пакетах оребрених труб зручнообтічної форми в умовах природної тяги.

Фізичний експеримент ставив за мету проведення аналізу структури течії та її представлення у вигляді полів швидкості і температур потоку за трубами теплообмінної секції. Вимірювання структури течії проводились над теплообмінною секцією. За результатами проведеного експериментального дослідження були отримані розподіли температурного напору (рис. 13) та швидкостей (рис. 14) вздовж ширини одно-

до однієї труби ($Q=50, 100, 150, 175$ Вт). Мінімальне значення температури знаходиться по центру зазору між ребрами, де відповідно знаходиться максимум швидкості. Можна припустити, що за плоскоовальною трубою утворюється вихор, при цьому середня швидкість потоку в цій області мало залежить від теплового навантаження.

На рис. 15 представлена чисельна візуалізація температурних полів і миттєвих швидкостей потоку в міжреберному каналі ряду плоскоовальних труб з неповним оребренням.

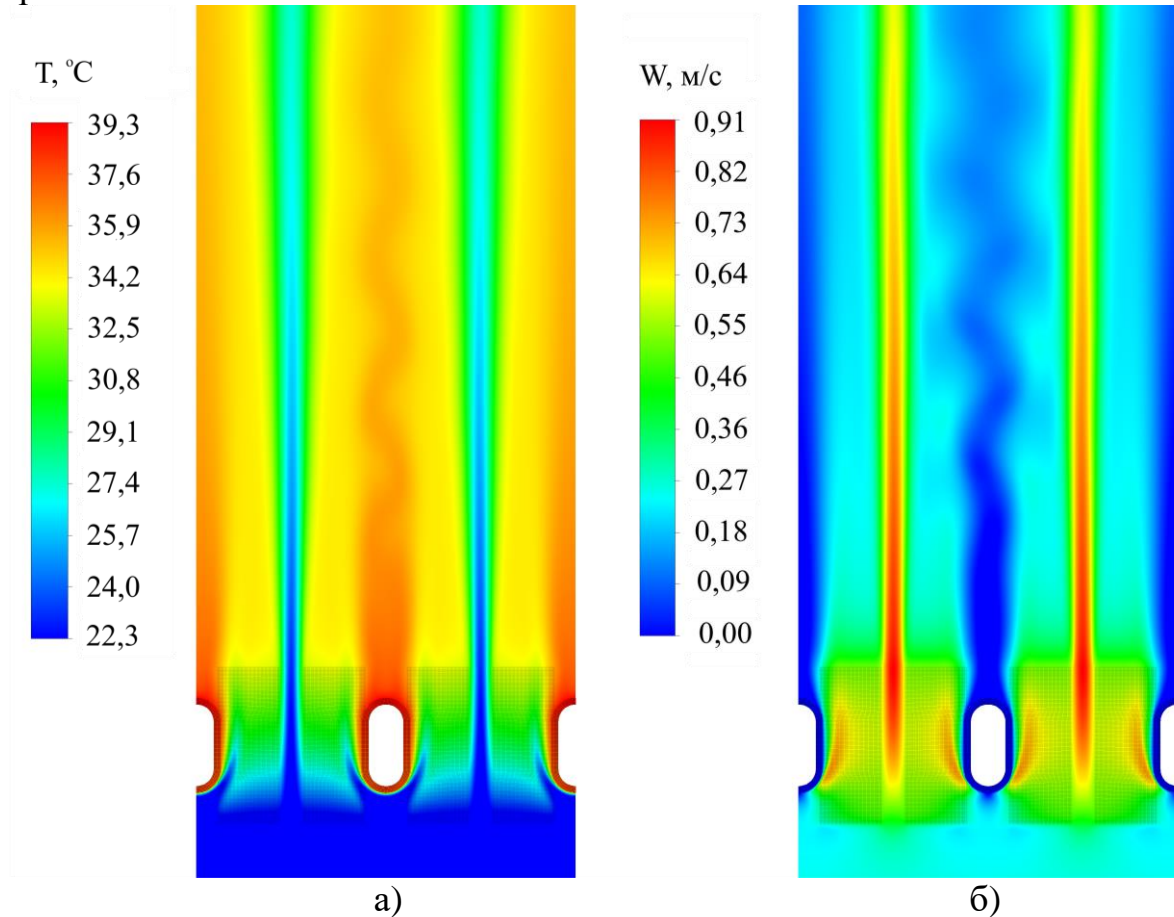


Рис. 15 – Розподіл температур (а) і швидкостей потоку (б) в міжреберному каналі при тепловому навантаженні на одну трубу $Q=100$ Вт

Приведений розподіл температур свідчить, що на поверхні плоскоовальної труби максимально нагрітою є кормова за ходом потоку зона, а зона з мінімальною температурою розташована в лобовій точці. На поверхні плоскоовальної труби і її ребрах починає розвиватися тепловий примежовий шар, товщина якого збільшується по мірі просування потоку вглиб міжреберного каналу. Максимальну товщину примежового шару можна оцінити візуально (пристінна область поблизу несучої труби (рис. 15, а). Такий аналіз свідчить, що зі збільшенням підведеної потужності товщина примежового шару зменшується, що в свою чергу свідчить про збільшення локальної швидкості потоку.

Сказане вище підтверджується результатами розподілу миттєвих швидкостей в центральній площині міжреберного каналу (рис. 15, б). Аналіз рисунку підтверджує прогнозовану тенденцію про збільшення швидкості в місцях підвищеної температури. З рис. 15 видно, що потік, який рухається знизу вгору під дією різниці

густин повітря, в першу чергу направляється в зазор між торцями ребер сусідніх труб, де і спостерігається максимальна швидкість потоку. При цьому, зі збільшенням підведеного теплового потоку спостерігається збільшення швидкості потоку.

Аналіз рис. 16, на якому зображено лінії току повітря у ближньому сліді за трубою, свідчить, що в кормовій частині за ходом потоку спостерігається утворення двох протилежно закручених вихорів. Далі за рухом течії утворюється вихрова доріжка Кармана, що узгоджується із загальноприйнятою картиною течії при поперечному обтіканні труб.

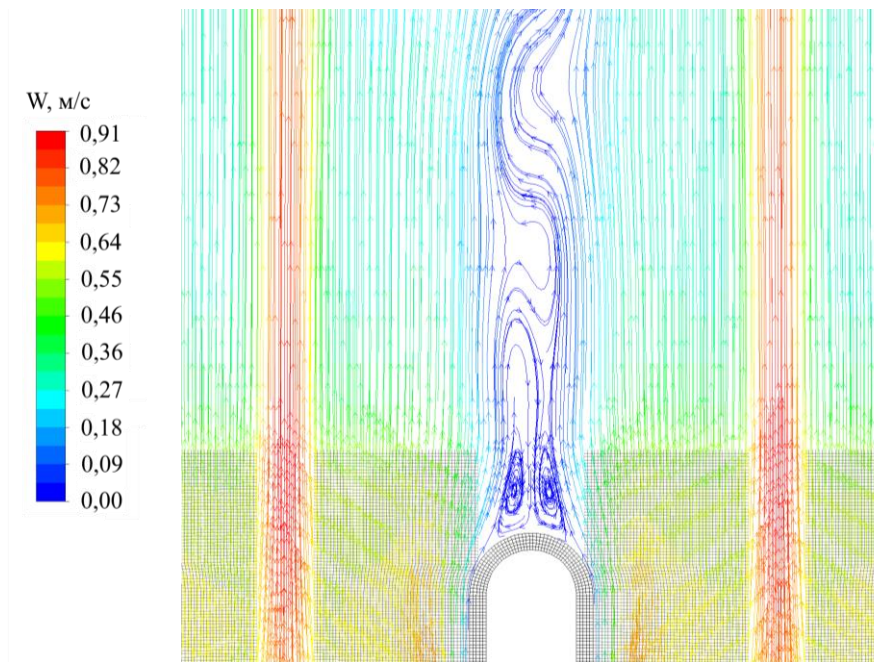


Рис. 16 – Траєкторії руху частинок у ближньому сліді при тепловому навантаженні на одну трубу $Q=100$ Вт

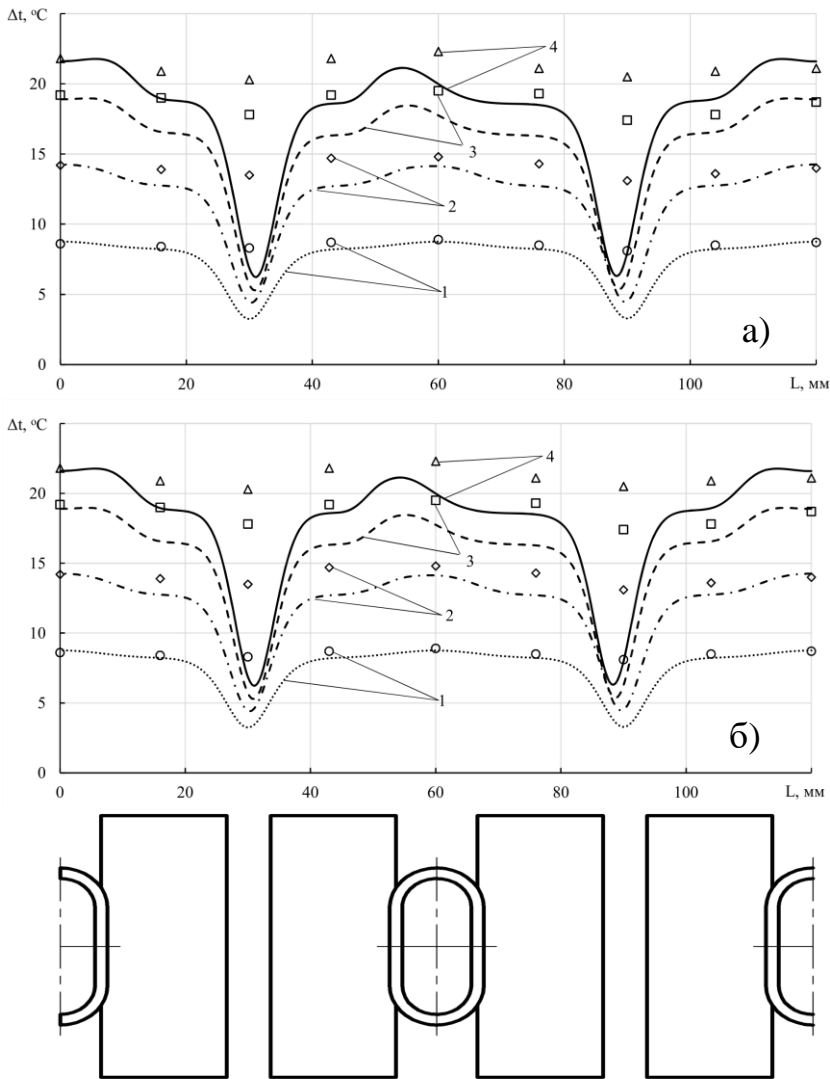
Крім того, варто відзначити, що утворювана кормова циркуляційна зона по своєму відносному розміру є меншою, ніж для круглих ребристих труб з аналогічним периметром перерізу. Ця зона відзначається низькою інтенсивністю циркуляційних течій, і, відповідно, низькою інтенсивністю теплообміну з поверхнею ребер. Тому кормова частина ребер традиційних повністю ореб-

рених труб практично не працює і є баластною. Це свідчить про те, що відсутність частини оребрення у кормовій зоні плоскоовальних труб з неповним оребренням є цілком виправданою. Вона призводить до суттєвого зниження металоємності оребреної поверхні та значного спрощення та покращення технологічності її виготовлення.

З метою наочної оцінки співвідношення між фізичним і обчислювальним експериментом, представлені графічні залежності верифікації температурних напорів і миттєвих швидкостей потоку (рис. 17) вздовж ширини міжреберного каналу L . На рис. (17) суцільні лінії представляють результати CFD-моделювання, а точки відображають результати експериментальних досліджень.

Верифікація значень температурних напорів і миттєвих швидкостей потоку та побудова їх двовимірних графічних залежностей фіксувалися відповідно проведеному фізичному експерименту.

Приведена верифікація числових даних свідчить, що середня похибка між числовими та експериментальними даними становить 18%. При цьому, найбільші відхилення розподілів як і швидкостей, так і температурних напорів спостерігаються у просторі між ребрами сусідніх труб. Варто відмітити, що розподіли швидкостей та температурних напорів, визначені за результатами експериментальних досліджень



1 – $Q=50$ Вт; 2 – $Q=100$ Вт;
3 – $Q=150$ Вт; 4 – $Q=175$ Вт

Рис. 17 – Верифікація розподілу температурного напору (а) і швидкостей (б) по ширині пакету:

природної тяги в діапазоні чисел Релея $Ra = 2,8 \cdot 10^3 \dots 13,2 \cdot 10^3$.

Шостий розділ присвячений оцінці теплоаеродинамічної ефективності пакетів плоскоовальних труб з неповним оребренням, який виконано за допомогою порівняльного аналізу характеристик апаратів повітряного охолодження з природною тягою виконаних на базі найбільш розповсюджених на ринку України різних типів оребрених труб.

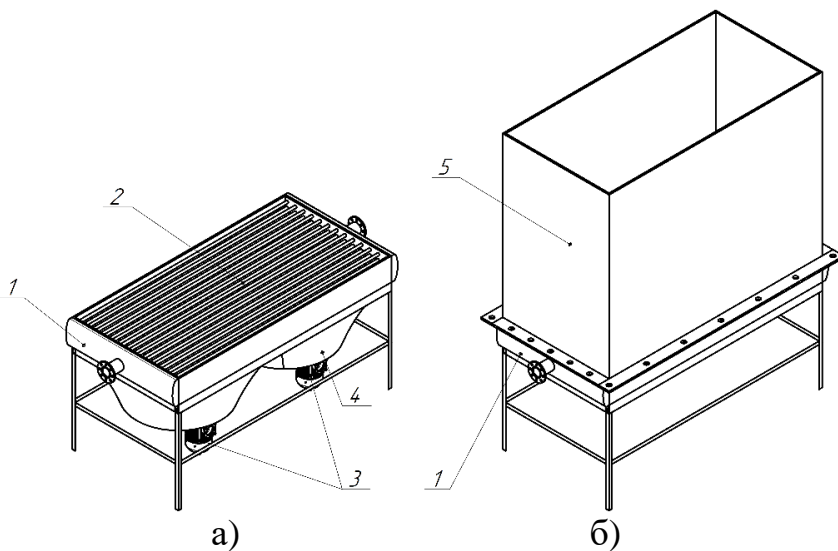
У якості такого теплообмінного апарату було обрано апарат повітряного охолодження (рис. 18, б), у якому забезпечення проходу необхідної кількості повітря через поверхню теплообміну (поз. 1 рис. 18) виконується за допомогою витяжної башти (поз. 5 рис. 18, б). Завдяки такому рішенню з конструкції АПО виключаються осьові вентилятори (поз. 3 рис. 18, а) та їх дифузори (поз. 4 рис. 18, а) та повністю виключаються витрати електроенергії на привід вентиляторів.

Для виконання варіантних розрахунків АПО з природною тягою були обрані чотири найбільш поширені типи оребрених труб, представлені на ринку України –

та CFD-моделювання мають ідентичний характер.

Приведена верифікація числових даних свідчить про достатню кореляцію результатів експериментальних і числових розподілів швидкостей та температурних напорів. Це дозволяє використовувати розроблену методику для визначення оптимальних за інтенсивністю теплообміну геометричних та крокових характеристик ряду плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної тяги. Це дозволяє мінімізувати витрати на експериментальні дослідження шляхом зменшення кількості варіантів їх геометричних характеристик та крокових характеристик їх розташування.

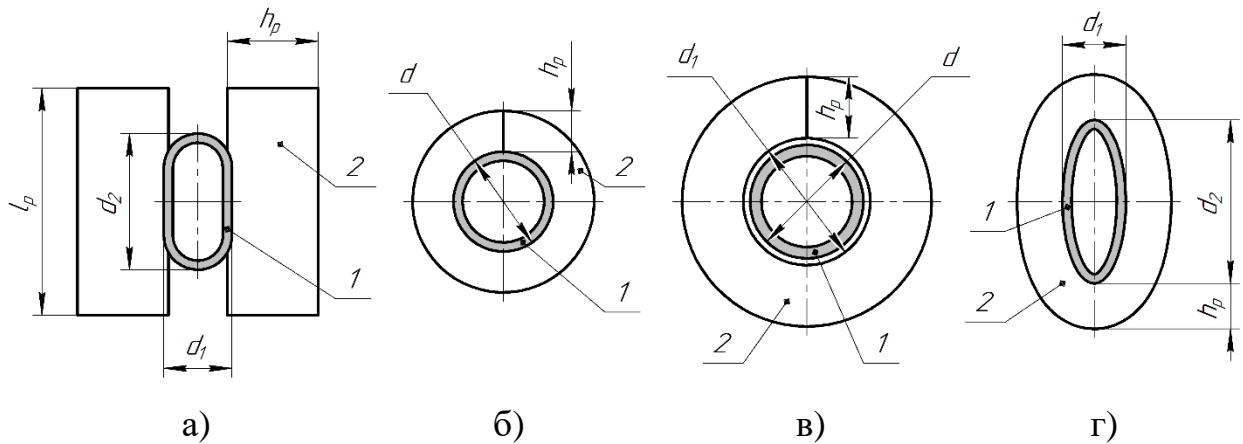
Розглянута методика може бути використана для CFD моделювання інтенсивності теплообміну плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах



- а – з встановленими вентиляторами;
 б – з встановленою витяжною баштою
 1 – теплообмінна секція; 2 – оребрена труба;
 3 – осьовий вентилятор з двигуном; 4 – дифузор;
 5 – витяжна башта

Рис. 18 – Загальний вигляд апарату повітряного охолодження

плоскоовальні труби з неповним оребренням, труби з приварним спірально-стрічковим оребренням, біметалеві труби з накатаним спіральним оребренням, та овальні труби з неповним оребренням, які мають приблизно однакові значення периметрів їх внутрішніх перетинів. Загальний вигляд даних труб представлений на рис. 19. Геометричні характеристики даних оребрених труб були обрані у відповідності до їх наявності на ринку. Слід зазначити, що у всіх згаданих варіантах труби розташовувались у шаховому компонуванні.



- а – плоскоовальна труба з неповним оребренням; б – труба з приварним спірально-стрічковим оребренням; в – біметалева труба з накатаним спіральним оребренням; г – овальна труба з овальним оребренням 1 – труба-основа; 2 – оребрення

Рис. 19 – Типи оребрених труб, що порівнюються

У якості теплообмінного апарату для порівняння було обрано апарат повітряного охолодження з природною тягою потужністю 1 МВт. Температура рідини на вході складала 80 °С, на виході – 65°С. При розрахунках приймалося, що забезпечення необхідної витрати повітря (25 м³/с) для відведення заданої потужності у всьому діапазоні навантажень здійснюється лише за допомогою витяжної башти.

Співставлення виконувалось по чотирьох найбільш важливих характеристиках – загальній довжині оребрених труб L_{mp} , тепловій потужності, що відводиться від одного погонного метру труби q_l , аеродинамічному опору теплообмінного апарату

ΔH , та пов'язаною з ним висотою витяжної башти H_6 . У якості узагальнюючого критерію, який показує економічну доцільність застосування того чи іншого типу труб, було обрано суму капітальних витрат на виготовлення апарату $\Sigma_{\text{кап}}$ (рис. 20).

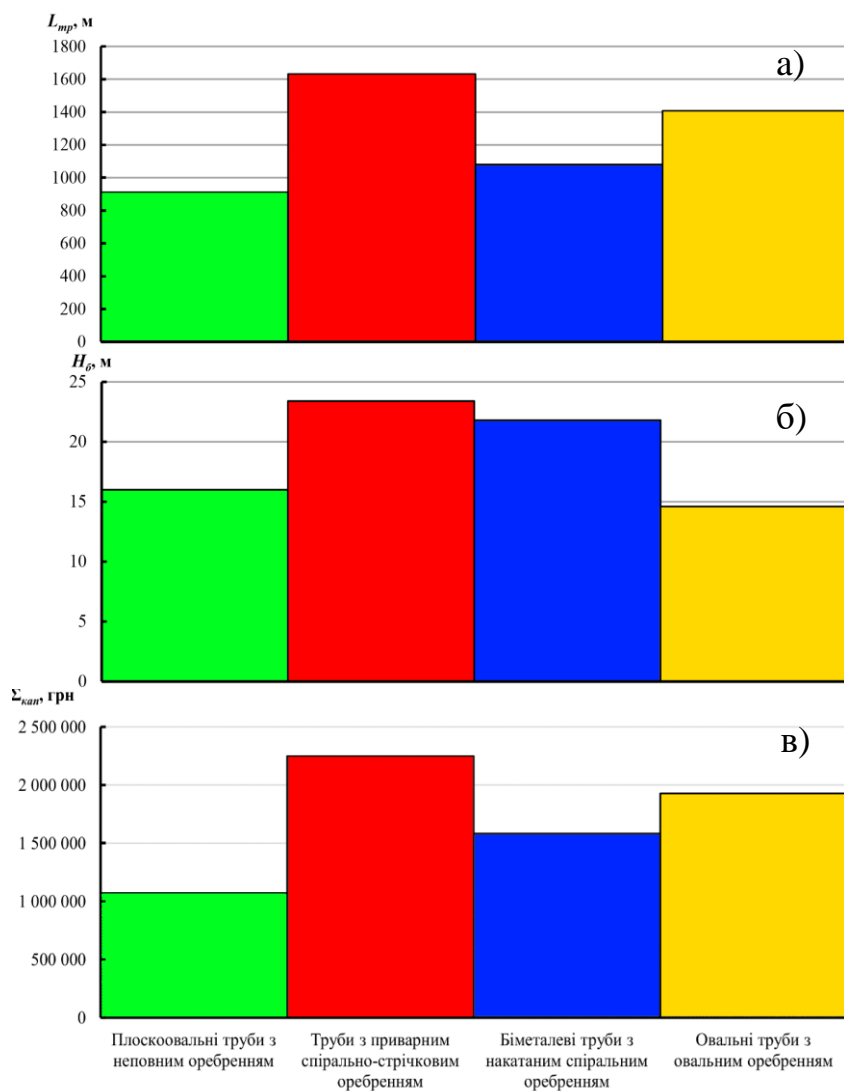


Рис.20 – Співставлення довжин труб (а) висот башт (б) та сум капітальних витрат(в) на виготовлення АПО з природною тягою

доцільним у конструкціях апаратів повітряного охолодження при будь-якому режимі їх роботи.

Опанування технології серійного масового виготовлення плоскоовальних труб з неповним оребренням дозволить налагодити виробництво вітчизняних сучасних ефективних апаратів повітряного охолодження, та інших рекуперативних пристроїв типу «газ-рідина» та відмовитись від імпорту коштовного зарубіжного теплообмінного обладнання.

Сьомий розділ описує методику конструкторського розрахунку теплообмінних апаратів на базі пакетів плоскоовальних труб з неповним оребренням, що працюють в умовах природної тяги. У розділі наведено повну методику розрахунку теплообміну та аеродинамічного опору такого теплообмінного апарату з урахуванням отриманих розрахункових залежностей.

За результатами проведених варіантних розрахунків АПО з природною тягою визначено, що варіант на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням має найменшу сумарну довжину оребрених труб, найбільшу теплову потужність, що відводиться від одного погонного метру труби, прийнятну висоту витяжної башти та має найменшу суму капітальних витрат на його виготовлення. Найкращі характеристики АПО на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням пов'язані перш за все з їх високою теплоаеродинамічною ефективністю.

Враховуючи дане дослідження та наведені у інших роботах переваги таких труб при їх роботі у режимі вимушеної конвекції, застосування плоскоовальних труб з неповним оребренням є

ВИСНОВКИ

За результатами виконання комплексної роботи з дослідження теплообміну та аеродинамічного опору плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної конвекції та природної тяги можна зробити наступні висновки:

1. Отримані розрахункові залежності, що з достатньою точністю описують інтенсивність тепловіддачі поодиноких плоскоовальних труб з неповним оребренням за умов $h_p = 20...30$ мм; $t = 2...8$ мм, в діапазоні чисел Релея $5\ 000 < Ra < 51\ 000$, похибка узагальнюючого рівняння не перевищує $\pm 17\ %$.

2. Виконані експериментальні дослідження інтенсивності конвективного теплообміну і аеродинамічного опору пакетів плоскоовальних труб з неповним оребренням при їх роботі в режимних умовах, що відповідають умовам природної тяги ($500 < Re_{dl} < 3000$) дозволили отримати нові системи узагальнюючих співвідношень, що дозволяють розраховувати значення коефіцієнтів теплообміну і аеродинамічного опору для шахових пакетів плоскоовальних труб з неповним оребренням в діапазоні зміни параметра розміщення $S_1/S_2 = 0,6...2,5$ та коефіцієнта оребрення $\psi = 5,3...21,5$. Похибка розрахункових формул для інтенсивності теплообміну не перевищує $\pm 12\ %$, а для розрахунку аеродинамічного опору $\pm 20\ %$.

3. Для розрахунку коефіцієнта ефективності ребер плоскоовальних труб з неповним оребренням, в області зміни параметра ребра $\beta h = 0,2...0,6$, підтверджена можливість використання відомої формули Є. М. Письменного, яка апроксимує отримані дослідні значення з похибкою $\pm 2\ %$.

4. Отримані дані з особливості обтікання труб в умовах природної тяги і впливу структури течії на інтенсивність їх тепловіддачі свідчать про наявність кормової циркуляційної зони, яка відзначається низькою інтенсивністю циркуляційних течій, і, відповідно, низькою інтенсивністю теплообміну з поверхнею ребер, що підтверджує доцільність відсутності частини оребрення у кормовій зоні плоскоовальних труб з неповним оребренням.

5. Використання плоскоовальних труб з неповним оребренням в конструкціях теплообмінних апаратів з природною тягою дозволяє на 25-30% зменшувати суму капітальних витрат на їх виготовлення. Крім того, запропонований метод переведення АПО в режим природної тяги дозволяє практично виключити витрати електроенергії на привід двигунів вентиляторів, підвищити загальну ефективність роботи підприємства та знизити викиди парникових газів в атмосферу.

6. Запропонована методика конструкторського розрахунку рекуперативних теплообмінних апаратів на базі пакетів плоскоовальних труб з неповним оребренням, що працюють в умовах природної тяги. Розроблена методика дозволяє з достатньою для інженерної практики точністю проводити розрахунки теплообміну та аеродинамічного опору таких теплообмінних апаратів.

Результати дисертаційної роботи використані ТОВ „НВФ „Ганза” при проектуванні утилізаторів теплоти за водогрійними котлами типу ВК-21 (КСВ-2,0) та FBG-2500, у яких видалення відхідних димових газів відбувається лише за рахунок тяги димової труби.

Матеріали дисертаційної роботи застосовуються в навчальному процесі при підготовці студентів 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. Vozniuk M., Pis'mennyi E., Terekh A., Baranyuk A., Kondratyuk V. Flow structure definition in the bundles of flat-oval tubes with incomplete finning under conditions of natural draft Eastern-European Journal of enterprise technologies. 2020. No 5/8(107). P. 74 – 79. (видання включено до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України та міжнародних наукометричних баз SCOPUS, EBSCO, Directory of Open Access Journals (DOAJ), OpenAIRE, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Google Scholar, Index Copernicus та ін.).

У публікації автору належить розробка CFD моделі та аналіз отриманих даних з швидкості течії у пакеті.

2. Вознюк М.М., Рогачов В.А., Терех О.М., Баранюк О.В. Теплообмін пакетів плоскоовальних оребрених труб в умовах вільної конвекції і природної тяги. Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». 2016. №2. С. 46 – 53. (Google Scholar, Index Copernicus та ін.).

У публікації автору належить узагальнення та проведення порівняльного аналізу отриманих даних з теплообміну для шахового та коридорного пакетів .

3. Вознюк М.М., Семеняко О.В., Бондар В.А. Оптимальная высота поперечных ребер плоскоовальной трубы. Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». 2016. №4. С. 60 – 65. (Google Scholar, Index Copernicus та ін.).

У публікації автору належить виконання розрахунків коефіцієнту ефективності ребра в залежності від матеріалу виконання оребрення.

4. Вознюк М.М., Кондратюк В.А., Письменний Є.М., Терех О.М. Теплообмін поодинокій плоскоовальній труби з неповним оребренням в умовах вільної конвекції Теплофізика та Теплоенергетика. 2020. № 3(42). С 29 – 38. (WorldCat, ResearchBib, EBSCO, IndexCopernicus).

Автор виконав розробку CFD моделей 12 типорозмірів оребрених труб та верифікацію числової моделі.

5. Вознюк М.М., Письменний Є.М., Терех О.М., Ліщишин В.Ю., Конько Д.В. Аналіз економічної ефективності використання плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної тяги. Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». 2020. №1. С. 60-67. (Google Scholar, Index Copernicus та ін.)
Автор виконав варіантні теплові розрахунки апарату повітряного охолодження, працюючого в умовах природної тяги на базі різних оребрених труб

- *статті в інших виданнях:*

6. 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.

Автор приймав участь у постановці задачі та аналізі отриманих результатів

7. Письменний Е. Н., Рогачов В. А., Баранюк А. В., Семеняко А. В., Вознюк М. М. CFD-моделирование омывания поверхности труб удобообтекаемой

форми с неполным поперечным оребрением. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2014. №2 (21), часть 1. С. 76 – 78.

Автор приймав участь в розробці CFD-моделі та аналізі вихідних даних для проведення моделювання.

8. Вознюк М.М., Терех О.М., Рогачов В.А., Баранюк О.В. Теплообмін поперечно-омиваних шахових пучків плоскоовальних оребрених труб при малих числах Рейнольдса. *ScienceRise*. 2015. №5/2 (10). С. 36 – 40. (**Google Scholar, Index Copernicus**).

У публікації автору належить розробка методики експериментальних досліджень та участь у обробці результатів дослідження.

9. Вознюк М.М., Башкір І.С., Терех О.М., Рогачов В.А., Руденко О.І. Аеродинамічний опір шахових пакетів плоскоовальних оребрених труб при малих числах Рейнольдса. *ScienceRise*. 2015. №6/2 (11). С. 90 – 94. (**Google Scholar, Index Copernicus**).

У публікації автору належить розробка методики експериментальних досліджень та участь у обробці результатів дослідження.

10. Руденко О.І., Мезенцева О.О., Терех О.М., Вознюк М.М. Інноваційне енергозберігаюче устаткування для підприємств теплокомунальної енергетики *Науковий вісник Ужгородського університету*. Серія «Економіка». 2016. №2 (48) С. 228 – 232. (**Google Scholar, PИЦ, Index Copernicus**).

У публікації автору належить представлення даних з практичного досвіду використання економайзера.

11. Вознюк М.М., Терех О.М., Руденко О.І., Рева С.А., Баранюк О.В. Теплообмін плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах вільної конвекції та природної тяги. *ScienceRise*. 2016. №2/2 (19). С. 10 – 14. (**Google Scholar, Index Copernicus**).

У публікації автору належить розробка методики проведення експерименту та аналіз даних з теплообміну поодинокі труби.

- патенти України на корисну модель:

12. Теплоутилізатор: пат. 96194 Україна: F22D 1/00, F28D 1/00. № u 2014 06783; заявл. 16.06.2014; опубл. 26.01.2015 Бюл. №2. 6 с.

Автор приймав участь у розробці принципової конструкції теплоутилізатора.

13. Деаератор: пат. 108649 Україна: F28D 15/02, F28F 1/12. № u 2016 00864; заявл. 03.02.2016; опубл. 25.07.2016 Бюл. №14. 5 с.

Автор приймав участь у розробці принципової конструкції теплообмінної поверхні деаератора.

14. Спосіб енергозбереження в апараті повітряного охолодження: пат. 110702 Україна: F28D 7/00, F28D 7/06. № u 2016 02427; заявл. 14.03.2016; опубл. 25.10.2016 Бюл. №20. 4 с.

Автор приймав участь у розробці принципу прилаштування додаткової витяжної бапти.

15. Теплообмінна біметалева труба: пат. 117554 Україна: F28F 1/12, F28D 15/02. № u 2017 01174; заявл. 09.02.2017; опубл. 26.06.2017 Бюл. №12. 5 с.

Автор приймав участь у розробці способу кріплення ребра до труби.

16. Теплообмінна труба: пат. 125288 Україна: F28F 1/10, F28F 1/12, F28F 13/02. № у 2017 10369; заявл. 27.10.2017; опубл. 10.05.2018 Бюл. №9. 6 с.

Автор приймає участь у вдосконаленні просічних ребер теплообмінної труби.

17. Теплообмінна труба: пат. 128747 Україна: F28F 1/00, F28F 13/00. № у 2018 02720; заявл. 19.03.2018; опубл. 10.10.2018 Бюл. №19. 6 с.

Автор приймає участь у аналізі варіантів розміщення ребра відносно вісі труби.

18. Теплообмінна труба: пат. 129839 Україна: F28F 1/10, F28F 1/12, F28F 13/02. № у 2018 06463; заявл. 11.06.2018; опубл. 12.11.2018 Бюл. №21. 5 с.

Автор приймає участь у аналізі варіантів інтенсифікації теплообміну плоских ребер краплеподібної труби.

19. Пасивна система охолодження трансформатора: пат. 136468 Україна: F28F 1/10, F28F 1/12, H01F 27/08. № у 2019 00729; заявл. 24.01.2019; опубл. 27.08.2019 Бюл. №16. 7 с.

Автор приймає участь у вдосконаленні варіантів розміщення пасивної системи охолодження.

20. Пластинчасто-ребриста теплообмінна поверхня: пат. 140448 Україна: F28F 3/02. № у 2019 08595; заявл. 18.07.2019; опубл. 25.02.2020 Бюл. №4. 6 с.

Автор приймає участь у аналізі варіантів розміщення ребер на плоскій основі.

- тези доповідей та матеріали конференцій:

21. Письменний Є. М., Вознюк М. М., Опыт внедрения теплоутилизаторов из плоскоовальных оребренных труб „Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики” : зб. тез доп. XXIII міжнар. конф. Київ, 2013. (м. Ялта, 4 – 8.06.2013 р.). С. 135-137.

Автор провів обґрунтування доцільності використання утилізаторів теплоти на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням, які встановлюються за котлами, у яких видалення продуктів згорання з газового тракту відбувається лише за рахунок самотяги димової труби.

22. Вознюк М. М., Письменний Є. М. Результаты работы теплоутилизационного оборудования на базе плоскоовальных труб с неповным оребрением. „Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики” : зб. тез доп. XII міжнар. наук.-практ. конф. Київ, 2014. (м. Київ, 22 – 25.04.2014 р.). Т.1. С. 51.

Автор провів дослідження результатів використання утилізаторів теплоти на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням, які встановлюються за котлами, у яких видалення продуктів згорання з газового тракту відбувається лише за рахунок самотяги димової труби.

23. Письменный Е. Н., Багрий П. И., Вознюк М. М. Опыт внедрения теплоутилизаторов из плоскоовальных оребренных труб. РНКТ-6: Труды 6 Российской национальной конференции по теплообмену. 27 – 31 октября 2014 года. г. Москва. Россия.

Автор провів дослідження результатів використання утилізаторів теплоти на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням, які встановлюються за котлами, у яких видалення продуктів згорання з газового тракту відбувається лише за рахунок самотяги димової труби.

24. Письменный С. М., Багрій П.І., Вознюк М. М., Опыт внедрения теплоутилизаторов из плоскоовальных оребренных труб „Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики”: зб. тез доп. XXIV міжнар. конф. Київ, 2015. (м. Київ, 4 – 5.12.2014 р.). С. 147-150.

Автор провів дослідження результатів використання утилізаторів теплоти на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням, які встановлюються за котлами, у яких видалення продуктів згорання з газового тракту відбувається лише за рахунок самотяги димової труби.

25. Вознюк М. М., Письменный С. М. Теплообмін плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної конвекції і природної тяги. „Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики”: зб. тез доп. XIII міжнар. наук.-практ. конф. Київ, 2015. (м. Київ, 21 – 24.04.2015 р.). Т.1. С. 61.

Автор провів багатопланові експериментальні та числові дослідження теплообмін плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної конвекції і природної тяги.

26. Письменный Е.Н., Багрій П.И., Вознюк М.М. Эффективные теплоутилизаторы из плоскоовальных труб с неполным оребрением. XV Минский международный форум по тепломассообмену: труды XV Минского международного форума по тепломассообмену. Т.1. 23 – 26 мая 2016 года г. Минск. С. 181-182.

Автор провів оцінку результатів комплексного впровадження утилізаторів теплоти на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням, які встановлюються за котлами, у яких видалення продуктів згорання з газового тракту відбувається лише за рахунок самотяги димової труби.

АНОТАЦІЯ

Вознюк М.М. Теплообмін плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної конвекції і природної тяги.

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, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального завдання розробки наукових засад для створення ефективних теплообмінних пристроїв на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням, що працюють в умовах природної конвекції та природної тяги.

У роботі виконані комплексні експериментальні та CFD-дослідження теплообміну, аеродинамічного опору, характеристик і структури течії при роботі плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної конвекції та природної тяги.

Отримані узагальнюючі залежності для розрахунку інтенсивності конвективного теплообміну поодиноких плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах вільної конвекції та для розрахунку інтенсивності конвективного теплообміну та аеродинамічного опору шахових пакетів плоскоовальних труб з неповним оребренням при малих числах Рейнольдса.

Ключові слова: плоскоовальна труба, поперечне оребрення, теплообмін,

аеродинаміка, вільна конвекція, природна тяга, характеристики течії, пакет труб, енергоефективність, метод, розрахунок.

АННОТАЦИЯ

Вознюк М.М. Теплообмен плоскоовальных труб с неполным оребрением в условиях естественной конвекции и естественной тяги.

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, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной задачи разработки научных основ для создания эффективных теплообменных устройств на базе плоскоовальных труб с неполным оребрением, работающих в условиях естественной конвекции и естественной тяги.

В работе выполнены комплексные экспериментальные и CFD-исследования теплообмена, аэродинамического сопротивления, характеристик и структуры течения при работе плоскоовальных труб с неполным оребрением в условиях естественной конвекции и естественной тяги.

Получены обобщающие зависимости для расчета интенсивности конвективного теплообмена одиночных плоскоовальных труб с неполным оребрением в условиях естественной конвекции и для расчета интенсивности конвективного теплообмена и аэродинамического сопротивления шахматных пакетов плоскоовальных труб с неполным оребрением при малых числах Рейнольдса.

Ключевые слова: плоскоовальная труба, поперечное оребрение, теплообмен, аэродинамика, естественная конвекция, естественная тяга, характеристики течения, пакет труб, энергоэффективность, метод, расчет.

ANNOTATION

Vozniuk M.M. Heat transfer of flat-oval tubes with incomplete finning under conditions of natural convection and natural draft. – 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, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to solving the urgent problem of developing scientific foundations for creating efficient heat exchange devices based on flat oval tubes with incomplete finning, operating under conditions of natural convection and natural draft.

In this work, complex experimental and CFD studies of heat transfer, aerodynamic drag, characteristics and flow structure during the operation of flat oval tubes with incomplete finning under conditions of natural convection and natural thrust have been carried out.

The results of experimental and computational studies of a single flat - oval tube with incomplete finning under free convection are presented. According to the results of CFD modeling of a number of sizes of flat-oval tubes with incomplete finning, generalized calculation dependences are obtained, which describe with sufficient accuracy the heat

transfer intensity of single flat-oval tube with incomplete finning under natural convection conditions in a wide range of characteristics of their basic geometries.

Experimental studies of heat transfer of single-row and double-row staggered and corridor bundles of flat-oval tubes with incomplete finning in the conditions of free convection and natural draft in the range of Rayleigh numbers $3000 < Ra < 30000$ are performed. The difference of heat transfer in the conditions of free convection and natural draft is shown. Heat transfer of tube bundles in the conditions of natural draft is in 1,8 ... 2 times more than in the conditions of free convection. The results of the comparative analysis of heat exchange of staggered and corridor bundles showed that the intensity of heat exchange of staggered and corridor bundles in the conditions of free convection and natural draft at Rayleigh numbers $Ra < 7000$ is almost the same. At Rayleigh numbers $7000 < Ra < 20000$ in the mode of natural draft the intensity of heat exchange of a staggered bundle is 10 ... 13% higher, than corridor. To obtain a complete picture of the influence on the heat transfer of the transition from free convection to natural draft, comprehensive studies of heat transfer and aerodynamics of multi-row tube packages in the range of Reynolds numbers $500 < Re_{d1} < 20000$. New calculation dependences for determination of heat transfer coefficients and aerodynamic drag coefficients for $Re_{d1} < 3000$ are offered, the influence of basic geometrical and mode parameters on the intensity of external heat transfer and aerodynamic drag of flat - oval tubes with incomplete finning is established. To calculate the efficiency coefficient of the fins of flat-oval tubes with incomplete finning, in the region of change of the fin parameter $\beta h = 0,2 \dots 0,6$, the possibility of using the known formula, obtained by E. Pis'mennyi is confirmed, which approximates the obtained experimental values with an error of $\pm 2\%$.

Experimental and numerical results of the distributions of the velocity and temperature fields near the surface of flat oval tubes with incomplete finning and in the wake behind them are presented, which made it possible to expand the understanding of the features of the flow around the tubes and the effect of the flow structure on the intensity of their heat transfer under natural draft conditions. It was established that the hydrodynamic flow pattern in the bundle of flat-oval tubes by the results of CFD-modeling meets classic representation of hydrodynamics. The absence of part of the fins in the aft part of flat-oval tubes with incomplete finning, where the formation of the aft circulation zone is observed, is substantiated.

Evaluation of thermoaerodynamic efficiency of packages of flat-oval tubes with incomplete finning is performed using a comparative analysis of the characteristics of air cooling devices operating in the conditions of natural draft made on the basis of different types of finned tubes. The performed variant calculations of the air cooler, in which the air consumption is provided only by the exhaust tower, showed that the variant of the heat exchanger based on flat oval tubes with incomplete finning has the least amount of necessary capital costs for its manufacture.

A method of thermal and aerodynamic design calculation of a heat exchanger based on flat oval tubes with incomplete finning, operating under natural draft conditions, is proposed.

Keywords: flat oval tube, transverse finning, heat transfer, aerodynamics, natural convection, natural draft, flow characteristics, tube bundle, energy efficiency, method, calculation.