

Автореферат Н
С 82

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

Стоянов

СТОЯНОВ ПАВЛО ФОМИЧ

УДК 621.184.

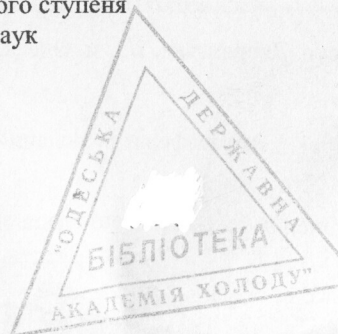
УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕПЛОБІМНИХ ПОВЕРХОНЬ АПАРАТІВ
ПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ

05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка,
системи кондиціонування

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса-2011



Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеській державній академії холоду Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Лагутін Анатолій Юхимович, проректор з наукової роботи Одеської державної академії холоду МОНМС України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Радченко Микола Іванович, завідувач кафедри кондиціонування та рефрижерації національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова МОНМС України

доктор технічних наук, професор
Ткаченко Станіслав Йосипович, завідувач кафедри теплоенергетики Вінницького національного технічного університету МОНМС України

Захист дисертації відбудеться 16 травня 2011 р., в ауд. 108 о 14³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.41.087.01 в Одеській державній академії холоду за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

Дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ОДАХ за адресою:

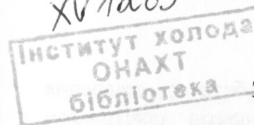
вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

(39)

Затверджено членом спеціалізованої вченої ради 4.04. 2011 р.

Мілованов В.І.

Мілованов В.І.



- 1 -

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В умовах безперервного зростання енергосилових потужностей проблема інтенсифікації теплообміну в теплообмінних апаратах є однією з найбільш актуальних. Висока ефективність, технологічність виготовлення, компактність - це критерії вибору сучасного теплообмінного обладнання. Тенденції виснаження паливно-енергетичних ресурсів, зростання цін на виробництво енергії, а також глобальні екологічні проблеми є стимулюючими факторами впровадження високоефективних теплообмінних апаратів.

Зростання кількості населення та рівня потреб у водних ресурсах - одна з актуальних проблем сучасності, тому перевага віддається апаратам повітряного охолодження. В Україні з кожним роком зона застосування повітряних теплообмінників поширюється, і відмова від охолодження водою як традиційного засобу відведення тепла технологічних потоків забезпечить зростання рентабельності підприємств, особливо таких галузей промисловості, як харчова, хімічна, нафтопереробна та інші.

Підвищення попиту на апарати повітряного охолодження у масштабах країни спричиняє значне збільшення витрат металу. Тому проблема пошуку оптимальних варіантів теплообмінних поверхонь апаратів, які б забезпечували зменшення об'єму, маси і вартості, стоїть доволі гостро, а вдосконалення конвективних поверхонь теплообміну є пріоритетним науковим напрямком. Теплоаеродинамічні характеристики теплообмінних поверхонь залежать від великої кількості факторів, таких як геометричні параметри, умови набігання потоку повітря, властивостей теплоносіїв і т.д. Перспективним напрямком інтенсифікації теплообміну в апаратобудуванні є використання труб, профіль яких наближається до легкообтічного. Обтікання труб такого профілю супроводжується зниженими витратами енергії на транспортування теплоносія при відповідному незначному погіршенні теплообміну, що в остаточному підсумку призводить до підвищення енергетичної ефективності апарата в цілому.

Науково-прикладною задачею, яка вирішується в дисертаційній роботі, є вдосконалення теплообмінних поверхонь апаратів повітряного охолодження шляхом підвищення ефективності теплогідродинамічних процесів у міжреберних каналах.

Зв'язок з науковими програмами. Наукові дослідження і матеріали, представлені в дисертаційній роботі, тісно пов'язані з Постановою Кабінету Міністрів України від 22.02.2001 г. №2274-111 (2274-14) "Енергетична стратегія України на період до 2030 року" і програмами по енергозбереженню в рамках держбюджетних досліджень по темах МК09/09 "Дослідити та створити теплообмінні малоємні та безпечні системи для енергоспоживаючих установок галузей господарства", державний реєстраційний номер - №0109U000417 і МК09/12 "Створити нове покоління випарно-парокомпресійних та малоємних холодильних систем і систем кондиціонування повітря", державний реєстраційний номер - №0109U000420.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є створення ефективних оребрених поверхонь для теплообмінних апаратів повітряного охолодження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Проаналізувати існуючі типи теплообмінних поверхонь апаратів повітряного охолодження і визначити шляхи підвищення їх енергетичної ефективності.

2. Обґрунтувати вплив кута нахилу і кроку ребер на теплові та аеродинамічні характеристики поверхонь теплообміну.

3. Визначити теплові та аеродинамічні характеристики одиночних елементів і пучків оребрених труб на базі запропонованого кута нахилу ребер відносно вісі труби.

4. Провести чисельне моделювання аеродинамічних умов обтікання поверхні з нахиленим оребренням і виконати верифікацію розрахункових даних із результатами натурних експериментів.

5. Установити вплив геометричних параметрів нахиленого оребрення на течію потоку в міжреберному каналі.

6. Оцінити енергетичну ефективність запропонованих поверхонь і варіантів удосконалення теплообмінних апаратів повітряного охолодження.

Об'єкт дослідження: процеси теплообміну та аеродинаміки в пучках оребрених труб апаратів повітряного охолодження.

Предметом дослідження є параметри процесів теплообміну та аеродинаміки в апаратах повітряного охолодження (конденсаторах, "сухих" градирнях і міжступеневих холодильниках систем компримування газів) з удосконаленими теплообмінними поверхнями, які забезпечують підвищення енергетичної ефективності апаратів.

Методи дослідження: фізичне моделювання тепловіддачі та аеродинамічного опору одиночних елементів і пучків труб, температурних полів реберних елементів; чисельне моделювання впливу геометрії міжреберного каналу на аеродинамічні умови течії теплоносія.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Обґрунтовано напрям підвищення ефективності теплоаеродинамічних процесів у міжреберних каналах апаратів повітряного охолодження шляхом удосконалення конструкції оребрених труб.

2. Уперше запропоновано спосіб підвищення ефективності теплоаеродинамічних процесів у міжреберних каналах апаратів повітряного охолодження шляхом нахилу поперечних ребер відносно вісі труб, що забезпечує збільшення зони контакту ребер із трубою.

3. Встановлено закономірності теплообміну та аеродинаміки при обтіканні поверхні з нахилом ребер апаратів повітряного охолодження.

4. Отримано залежності інтенсивності теплообміну й аеродинамічного опору від кроку і кута нахилу ребер відносно осьової лінії труби.

5. Уперше визначено вплив розташування теплообмінних труб з похилим оребренням відносно потоку повітря у пучках на їх теплові й аеродинамічні характеристики.

6. Апробовано кінцево-елементні моделі розрахунку теплових і аеродинамічних процесів у міжреберному каналі, які дозволяють моделювати реальні умови експлуатації поверхонь теплообміну апаратів повітряного охолодження.

7. Виявлено структуру потоку повітря у міжреберному криволінійному каналі та визначено вплив подовжнього кроку і кута нахилу ребер на характер потоку у міжреберному каналі поверхні з нахилом ребер.

8. Встановлено вплив подовжнього кроку труб у пучку на аеродинаміку течії у міжреберному каналі поверхні теплообміну з похилим оребренням.

Новизна запропонованого типу ребристої поверхні з нахилом ребер захищена патентом України на корисну модель № 40389.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечена використанням апробованих сучасних методик і засобів вимірювального комплексу, задовільним узгодженням результатів фізичного і чисельного моделювання.

Наукове значення роботи:

– встановлено закономірності теплообміну та аеродинаміки при обтіканні поверхні з нахилом ребер апаратів повітряного охолодження, які характеризуються впливом розташування теплообмінних труб з похилим оребренням відносно потоку повітря у пучках і подовжнього кроку труб у пучку на теплові й аеродинамічні характеристики апаратів;

– виявлено структуру потоку повітря у міжреберному криволінійному каналі та визначено вплив подовжнього кроку і кута нахилу ребер на характер потоку у міжреберному каналі поверхні з нахилом ребер, зокрема встановлено, що криволінійна конфігурація міжреберного каналу забезпечує підвищення середньоінтегрального значення швидкісного потоку повітря по перетинах каналу і відповідно коефіцієнтів тепловіддачі;

– вперше отримано залежності інтенсивності теплообміну й аеродинамічного опору від кроку і кута нахилу ребер відносно осьової лінії труби;

– розроблено кінцево-елементну математичну модель розрахунку теплових і аеродинамічних процесів у міжреберних каналах апаратів повітряного охолодження з нахилом ребер;

– визначено раціональні параметри процесів теплообміну та аеродинаміки в апаратах повітряного охолодження та відповідні геометричні характеристики апаратів, зокрема встановлено раціональний діапазон значень кута нахилу ребер відносно осьової лінії труби $\gamma = 45 \text{ }^\circ \pm 60 \text{ }^\circ$, значення кроку ребер ($u = 6 \text{ мм}$).

Практичне значення отриманих результатів:

– розроблено новий тип ребристої поверхні апаратів повітряного охолодження з нахилом ребер;

– розроблено методику визначення інтенсивності теплообміну й аеродинамічного опору поверхонь з нахилом ребер апаратів повітряного охолодження;

– розроблено рекомендації з вибору кроку і кута нахилу ребер апаратів повітряного охолодження.

Результати дисертаційної роботи використовуються: при проектуванні та виготовленні дослідно-промислового зразка теплообмінника повітряного охолодження на ВАТ Орехівський завод "Машбудконструкція"; у лекційному курсі "Апарати холодильних установок" навчального процесу в ОДАХ.

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно створені експериментальні стенди для дослідження теплових та аеродинамічних характеристик теплообмінних поверхонь апаратів повітряного охолодження, розроблені методики проведення експериментальних досліджень. Виконані порівняльні випробування конвективних поверхонь нового типу та оброблені експериментальні дані. Проведено чисельне моделювання течії потоку повітря в міжреберному каналі. Проаналізовано результати досліджень і сформульовані висновки.

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи доповідалися й обговорювалися на I Міжнародній науково-технічній конференції "Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації", м. Миколаїв, 2008 р.; VII Міжнародній конференції по компресорам і холодоагентам «Компресори-2009», м. Папернічка, Словаччина, 2009; IV Всеукраїнському науково-технічному семінарі "Удосконалення малої холодопотехніки і забезпечування нею технологічних процесів", м. Донецьк, 2009 р.; I Міжнародній науково-технічній конференції "Інновації в суднобудуванні і океанотехніці", м. Миколаїв, 2010 р.; I Міжнародній конференції з елементами наукової школи для молоді «Інноваційні розробки в області техніки і фізики низьких температур», м. Москва, 2010 р.

Публікації. Основні результати роботи викладені у 9 опублікованих працях, у тому числі: у 3 статтях у наукових журналах, затверджених ВАК України, 4 тезах доповідей на конференціях і 2 патентах України на корисну модель.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури і 3 додатків. Робота викладена на 151 сторінці друкованого тексту, містить 38 рисунків, 12 таблиць і список використаної літератури з 136 найменувань

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і основні завдання дослідження, відмічено зв'язок роботи з науковими програмами, приведена наукова новизна і практична цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** приведено огляд теоретичних та експериментальних робіт, присвячених дослідженню теплових та аеродинамічних характеристик поверхонь теплообміну апаратів повітряного охолодження. Серед багаточисельних

робіт, присвячених цьому питанню, можна виділити роботи Антуфьєва В.М., Schmidt E., Кейса В.М., Лондона А.Л., Фастовського В.Г., Юдіна С. Ф., Скрінські А.Ю., Стасюлявічюса Ю.К., Жукаускаса А.А., Мігая В.К., Кунтиша В.Б., Письменного С.М., Тереха О.М. та інших.

Розглянуті найбільш поширені типи ребристих поверхонь, оцінені їх переваги і недоліки, проаналізовано результати експериментальних досліджень. Оцінено вплив різних чинників на основні показники енергетичної ефективності оребрених поверхонь в умовах вимушеної конвекції. Визначені можливі варіанти її підвищення за рахунок використання різного роду турбулізаторів потоку. Перешкоджаючими умовами успішного рішення питання виступають наступні чинники: наявність застійних тінювих зон на поверхні теплообміну, виникнення турбулентних течій, особливості формування теплового і гідродинамічного пограничних шарів. Чисельне дослідження дозволяє розширити можливості дослідного вивчення аеродинамічних характеристик оребрених поверхонь і виявити фізичну природу процесів, які відбуваються, при перебігу теплоносія у міжреберних каналах складної конфігурації. В огляді розглянуто можливості комп'ютерного моделювання і потенціал його використання в апаратобудуванні. Найбільший інтерес дослідників викликають поверхні теплообміну, які забезпечують підвищення значень коефіцієнтів тепловіддачі при досить невеликому прирості аеродинамічного опору. Останнім часом дослідників зацікавили ребристі системи з «wavy fin», (Chi-Chuan Wang, Dong Junqi та інші.), які дозволяють інтенсифікувати теплообмін з одночасним підвищенням компактності апаратів. Аналіз стану питання показав, що ефективним методом інтенсифікації теплообміну є зміна структури турбулентного потоку шляхом організації відривних течій (Письменний С.М., Joardar A.).

На підставі аналізу сучасних тенденцій в області вдосконалення конвективних поверхонь теплообміну висунута робоча гіпотеза по удосконаленню апаратів і сформульована постановка завдань справжньої роботи.

У **другому розділі** приведено опис експериментальних стендів для дослідження одиночних реберних елементів і одиночних оребрених труб, прийнятих методик проведення досліджень та обробки отриманих даних. У розділі представлені результати досліджень трубчасто-реберних поверхонь теплообміну нового типу на базі використання похилого оребрення. Основна ідея при створенні відмічених поверхонь полягала в організації сприятливих умов обтікання поверхні теплообміну і створенні впорядкованого розподілу потоку повітря по глибині пучку оребрених труб. Попередня оцінка теплових характеристик одиночних ребер виявила передбачуваний ефект підвищення теплової ефективності при використанні похилої посадки поперечних ребер на теплообмінну трубу круглого профілю.

Експериментально було оцінено вплив зміни крокових характеристик поперечного ребра ($u = 4,5,6$ і 10 мм) і кута його нахилу ($\gamma = 45^\circ, 60^\circ$ і 90°) відносно осьової лінії теплообмінної труби, в дослідженому інтервалі значень швидкостей повітря в живому перетині робочої ділянки $\omega_{ж.л} = 2,5-6$ м/с.

Загальний вигляд установки і принципова схема робочої ділянки для дослідження одиночних ребер, представлені на рис.1. Зіставлення теплотехнічних

характеристик ребристого елемента проводилося по умовних коефіцієнтах теплопередачі $K_{ум}$.

Значення $K_{ум}$ одиночного ребра в умовах стаціонарного теплового потоку визначалося по формулі:

$$K_{ум} = Q / (F_p \cdot \Delta t_{ум}) \quad (1)$$

де Q – теплове навантаження ребристого елемента, Вт; F_p – площа зовнішньої поверхні ребра, м²; $\Delta t_{ум}$ – температурний натиск між температурою поверхні у центрі суцільного квадратного ребра і температурою повітря на вході в робочу ділянку, °С.

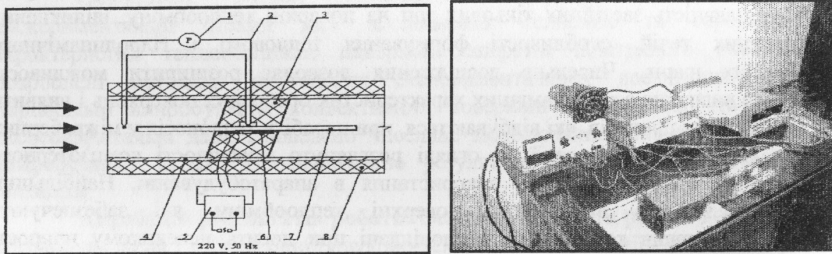


Рис.1. Принципова схема робочої ділянки і загальний вигляд установки
1 – мілівольтметр; 2 – диференціальна терморпара; 3 – бобишка; 4 – канал експериментальної ділянки; 5 – джерело постійного струму 5Б-43; 6 – дисковий нагрівач; 7 – досліджуване ребро; 8 – теплоізоляція

Результати теплотехнічних випробувань одиночних ребер представлені на рис. 2 і 3.

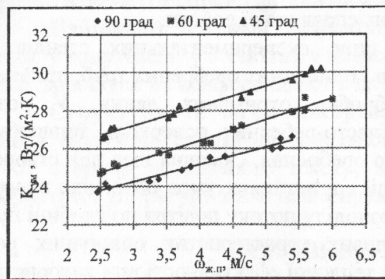


Рис. 2 Залежність $K_{ум} = f(\omega_{ж.п})$ при кроці ребра 4,5,6 і 10 мм

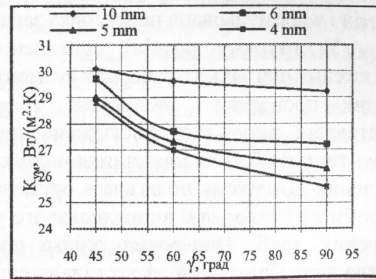


Рис. 3 Залежність $K_{ум} = f(\gamma)$ при кроці ребра 4 мм

Дослідження одиночних поперечних ребер, при зміні товщини і форми бобишок, які імітують елементи труби, що не беруть участь в теплообміні, підтвердили відомі висновки про зростання коефіцієнтів тепловіддачі і відповідно умовних коефіцієнтів теплопередачі при збільшенні міжреберного зазору (рис.3).

Проведена серія експериментів дозволила оцінити вплив кроку (рис.3) і кута нахилу (рис.2) поперечного ребра на його теплові характеристики. На рис.3 представлено графік залежності умовного коефіцієнта теплопередачі ($K_{ум}$) від кута нахилу ребра (γ) при різних значеннях кроку ребра (u) при фіксованому значенні швидкості повітря ($\omega = 4,5$ м/с) в «живому» перетині робочої ділянки. Характер залежностей $K_{ум} = f(\omega)$ підтвердив переваги похилого розташування поперечних ребер. Проведені експериментальні дослідження одиночних реберних елементів дозволили обґрунтувати вибір прийняттого кута нахилу ребер відносно осьової лінії труби і діапазон допустимого кроку оребрення. Проте відмічені переваги одиночних моделей похилих ребер не відображають реальної картини процесу. Для комплексних порівняльних випробувань було виготовлено одиночні оребрені труби. Дослідження теплових і аеродинамічних характеристик одиночних труб з похилими ребрами стало логічним продовженням роботи, що базується на результатах дослідження одиночних реберних елементів.

Принципова схема експериментальної установки для порівняльних випробувань одиночних оребрених труб представлена на рис.4. Установка являла собою аеродинамічну трубу розімкненого типу.

У робочій ділянці встановлювалися досліджувані елементи оребрених труб (рис. 5). Для всіх теплообмінних елементів постійними були: довжина труби - 0,3 м, крок ребер $u=0,004$ м, діаметр труби в підставі ребер $d_{пр}=0,018$ м. Розміри реберних елементів №1 та №2,3 були відповідно рівні 0,03 x 0,03 м та 0,03 x 0,038 м, що відповідало коефіцієнтам оребрення відповідно 8,6 та 9,7. Кут нахилу ребер відносно вісі труби відповідав $\gamma=90^0$ (елемент №1) та $\gamma=60^0$ (елементи №2 і 3). В порівнювальних елементах, для виключення контактного термічного опору, з'єднання ребер з трубою виконано паянням.

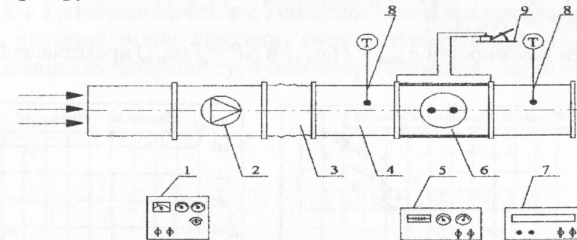


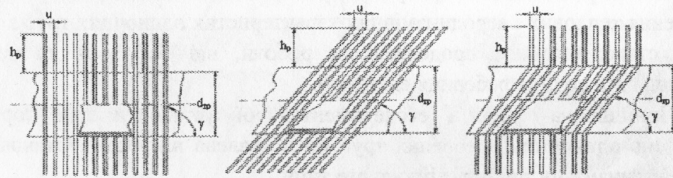
Рис. 4 Принципова схема установки для випробування одиночних оребрених труб
1 – блок управління двигуном вентилятора; 2 – осьовий вентилятор; 3 – шумоче з'єднання; 4 – ділянка стабілізації потоку; 5 – контрольно-вимірювальний блок живлення нагрівачів; 6 – робоча ділянка; 7 – мілівольтметр; 8 – точки виміру температури повітря; 9 – мікроманометр

Зіставлення теплових й аеродинамічних характеристик одиночних ребристих труб різного конструктивного виконання (рис. 5) було проведене по приведених коефіцієнтах тепловіддачі $\alpha_{прив}$ і втратам напору ΔP . Значення $\alpha_{прив}$ одиночних ребристих елементів, визначалося при використанні методу повного теплового моделювання при стаціонарному тепловому потоці.

Приведений коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{прив}$ визначається за формулою:

$$\alpha_{прив} = Q / [F_n(t_{тр} - t_{сер.п})] \quad (2)$$

де Q – теплове навантаження, Вт; F_n – площа зовнішньої поверхні оребреної труби, м²; $(t_{тр} - t_{сер.п})$ – різниця між середньою температурою труби в підставі ребра $t_{тр}$ і середньою температурою повітря $t_{сер.п}$, °C.



Елемент №1 Елемент №2 Елемент №3
Рис.5 Модифікації досліджених одиночних труб

Різниця статичного тиску (ΔP), на кордонах робочої ділянки, визначалася за показаннями мікроманометра ММН 240(5)-1,0. Порівняльні випробування одиночних оребрених труб проводилися в діапазоні швидкостей повітря у «живому» перетині робочої ділянки $\omega = 1,4-12,8$ м/с. Результати теплових і аеродинамічних випробувань оребрених труб узагальнені робочими залежностями вигляду: $\alpha_{прив} = f(\omega_{ж.п})$; $\Delta P = f(\omega_{ж.п})$.

Графіки залежностей $\alpha_{прив} = f(\omega_{ж.п})$ і $\Delta P = f(\omega_{ж.п})$ представлені на рис. 6 і 7.

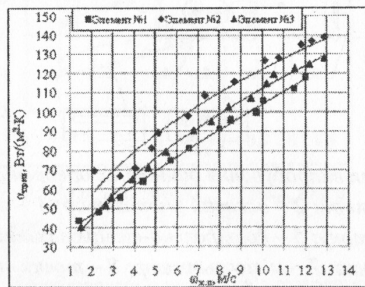


Рис.6 Графік залежності $\alpha_{прив} = f(\omega_{ж.п})$

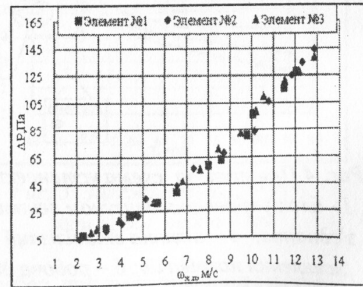


Рис. 7 Графік залежності $\Delta P = f(\omega_{ж.п})$

Теплотехнічні дослідження (рис. 6) підтвердили переваги труб з похилими ребрами. Відмічене підвищення теплової ефективності запропонованих поверхонь відбувається практично без погіршення (рис. 7) аеродинамічних показників. Слід зазначити, що для всіх досліджених труб забезпечувалася приблизна рівність коефіцієнтів оребрення поверхні β . У цьому випадку, для похилих ребер довжина ребра вздовж потоку повітря була більша, ніж для ребер, направлених по нормалі до поверхні труби ($\gamma = 90^\circ$). Таке рішення було прийняте для виключення впливу геометричних розмірів на порівнювані теплотехнічні показники досліджених труб. У зв'язку з цим можна стверджувати, що підвищення коефіцієнтів тепловіддачі на ~20 % елементу №2 у порівнянні з елементом №1, у діапазоні швидкостей повітря 5-13 м/с, пов'язано з інтенсифікацією процесу за рахунок нахилу ребер.

Виходячи з міркування зручності компоновки пучків труб з похилими ребрами, був досліджений альтернативний варіант з відігнутими ребрами (елемент №3). Проте така модифікація призвела до зниження коефіцієнтів тепловіддачі у порівнянні з елементом №2, без помітного погіршення гідравлічних характеристик.

У третьому розділі представлені результати дослідження поверхонь теплообміну із залученням сучасного програмного комплексу чисельного моделювання. У даному розділі описана методика проведення процесу комп'ютерного моделювання.

Мета комп'ютерного моделювання полягала у необхідності поглибленого аналізу перебігу потоку повітря у міжреберному каналі та в оцінці впливу його геометричних параметрів на теплові та аеродинамічні характеристики.

Для мінімізації потрібних обчислювальних ресурсів розрахунок у програмі чисельного моделювання проводився для частини симетричного міжреберного каналу. На рис.8 представлений приклад використовуваної кінцево-елементної сітки (КЕС) розглянутих моделей.

Для розрахунку перебігу потоку повітря у міжреберному каналі була використана k-ε Turbulence Model. k-ε Turbulence Model представляє собою рівняння Нав'є-Стокса і залежні змінні: кінетичну енергію турбулентності (turbulence kinetic energy- k) і швидкість дисипації турбулентності (dissipation rate of turbulence energy - ε):

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot \eta \cdot (\nabla u + (\nabla u)^T) + \rho \cdot (u \cdot \nabla) u + \nabla p = F, \quad \nabla u = 0 \\ \rho \cdot \frac{\partial k}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \cdot \nabla k \right] + \rho \cdot U \cdot \nabla k = \frac{1}{2} \cdot \eta_T \cdot (\nabla U + (\nabla U)^T)^2 - \rho \cdot \varepsilon \\ \rho \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \nabla \varepsilon \right] + \rho \cdot U \cdot \nabla \varepsilon = \frac{1}{2} \cdot C_{\varepsilon 1} \cdot \eta_T \cdot (\nabla U + (\nabla U)^T)^2 - \rho \cdot C_{\varepsilon 2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (3)$$

При виборі моделі аналізувалися особливості руху рідини, необхідна точність рішення і доступні обчислювальні ресурси. Точність результатів залежала від кроку розрахункової сітки (завичай характеризується параметром u^+ , який можна розглядати як локальне число Рейнольдса в елементарному об'ємі).

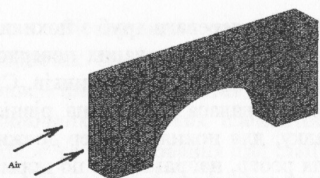


Рис. 8 Кінцево-елементна сітка моделі міжреберного каналу

Чисельне моделювання обтікання ребрених поверхонь теплообміну дозволило оцінити умови перебігу повітря у міжреберному каналі, його структуру і міру турбулентності. Дослідження охопили зміну відносного подовжнього кроку труб пакету в діапазоні $S_2/d=2,56\div 3,22$, і кута нахилу ребер $\gamma = (55 \div 90)^\circ$. Для всіх розглянутих випадків були незмінними зовнішній діаметр труб $d=0,018$ м, крок $u = 0,004$ м і висота ребра $h=0,014$ м.

На рис. 9 представлені результати моделювання перебігу потоку повітря у міжреберних каналах. На епорах приведені картини візуалізації ліній струму і розподілу швидкостей повітря в перетинах каналів різного конструктивного виконання (традиційна – $\gamma=90^\circ$ і криволінійна конфігурація – $\gamma=60^\circ$) по глибині каналу при фіксованій швидкості набігаючого потоку $\omega_n = 7$ м/с.

Характер розподілу ліній струму свідчить, що при переході від традиційної конфігурації каналу (рис.9.а) до варіанту організації звивистого перебігу потоку (рис.9.б) відбувається поліпшення умов обтікання застійних зон теплообмінної поверхні за рахунок зміни напрямів руху потоку на криволінійних ділянках каналу. Організація похилого розташування ребер сприяє підвищенню питомого тепловідводу. Враховуючи відмічене, виникає питання про вплив подовжнього кроку труб S_2 і кута нахилу ребер γ на значення середньоозваженої швидкості повітря $\omega_{сеп}$ по довжині каналу L.

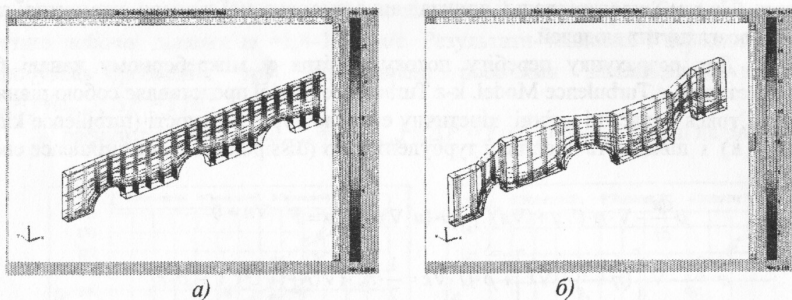


Рис. 9 Розподіл швидкості і візуалізація ліній струму по перетинах каналів: а)- поверхні з традиційним ребренням $\gamma = 90^\circ$); б)- поверхні з похилим ребренням $\gamma = 60^\circ$)

На рис. 10 представлені отримані залежності $\omega_{сеп} = f(\gamma)$ зміни швидкості від кута посадки ребер на трубу для різних значень відносного кроку труб у пучку (S_2/d). Для всіх розглянутих варіантів, збільшення кроку труб S_2 призводило до зниження $\omega_{сеп}$ і відповідно коефіцієнтів тепловіддачі. Динаміка зміни швидкісного поля потоку повітря у міжреберних каналах (рис.9, 10) дозволяє стверджувати про

теплову перевагу поверхонь з кутовою посадкою ребер відносно осьової лінії труби. При цьому найбільший ефект спостерігався при мінімальних кутах нахилу ребер.

Теплообмінна поверхня апаратів повітряного охолодження, як правило, омивається турбулентним потоком. Турбулентний потік характеризується значенням середньоінтегральної швидкості, просторовим її розподілом і наявністю пульсацій. Процеси, які протікають в тепловому і гідродинамічному пограничних шарах, зводяться до перенесення тепла і імпульсу, що у свою чергу визначає енергетичні показники.

При переході на поверхні з похилим ребренням відбувається підвищення теплової ефективності пучка труб. Зміна міжреберного каналу відображується в зміні загального швидкісного поля потоку.

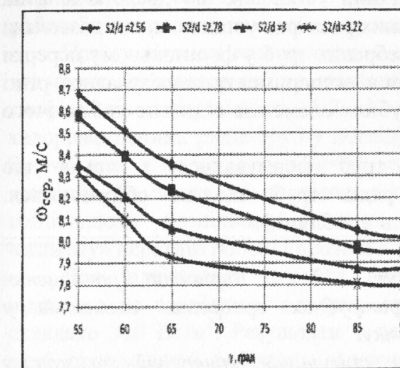


Рис.10.Графік залежності $\omega_{сеп}=f(\gamma)$

Аналіз характеру зміни швидкісного натиску на протилежних сторонах міжреберного каналу приведено на рис.11. Дослідження характеру швидкісного потоку показали, що при переході на криволінійну конфігурацію каналу (рис.11.б), відмінності в значеннях швидкостей потоку на стінках досягає в екваторіальній зоні ребра до 7%, а в кормовій частині ребра – до 30%. При накладенні швидкісних характеристики протилежних сторін міжреберного каналу традиційного конструктивного виконання (рис. 11.а) видно, що характер розподілу швидкісних показників потоку збігається.

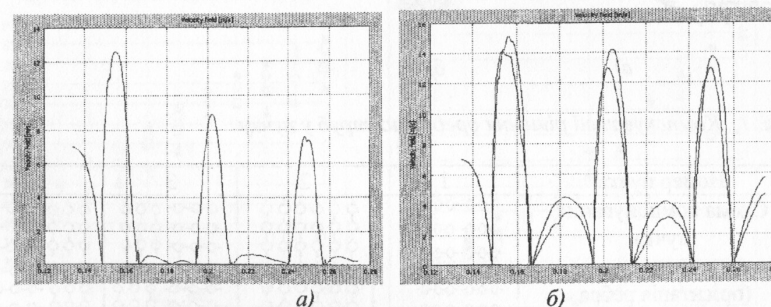


Рис.11 Характер зміни швидкісного натиску на протилежних сторонах міжреберного каналу: а) – кут нахилу ребра $\gamma=90^\circ$; б) – кут нахилу ребра $\gamma=60^\circ$

Аналізуючи динаміку зміни швидкісного потоку по довжині каналу, видно, що на розподіл швидкостей по глибині пучка істотно впливають труби, які стоять

попереду. Кормова частина ребра при цьому омивається циркуляційним потоком. При переході на криволінійний канал ($\gamma=85^{\circ}\pm 55^{\circ}$) відбувається підвищення середньоінтегральних значень швидкості потоку у міжреберному каналі. Таким чином, перехід до криволінійної конфігурації міжреберного каналу дозволяє поліпшити обтікання теплоносієм «тіньових» зон поверхні ребра тим самим поліпшуючи сумарний теплосійом.

Четвертий розділ роботи присвячено експериментальному дослідженню пучків труб з похилим оребренням. Теплові й аеродинамічні випробування пучків оребрених труб проведені в аеродинамічній трубі розімкненого типу. Загальний вигляд експериментальної установки аналогічний установці, що представлена на рис. 4. Основна відмінність полягає у габаритних розмірах установки, яка дозволяла компоувати шестирядні коридорні пучки оребрених труб у фронтальному перерізі робочої ділянки 0,3x0,3 м. У ході проведення експерименту аналізувалися різні варіанти орієнтації (рис.12) оребрених тритрубних елементів відносно набігаючого потоку повітря.

Досліджувані шестирядні пучки труб формувалися з трьох що обігріваються, що чергуються, і трьох рядів труб, що не обігріваються. Компоувальні рішення труб у пучку приведені в таблиці 1.

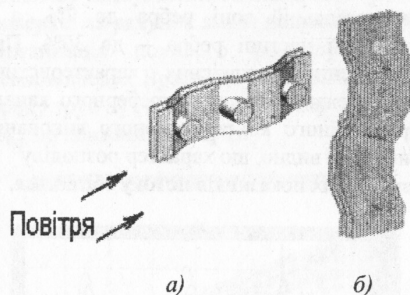


Рис. 12 Варіанти розміщення тритрубних оребрених елементів у пучку:

- а) орієнтація криволінійного каналу вздовж потоку повітря;
- б) орієнтація криволінійного каналу впоперек потоку повітря.

Табл. 1. Компоувальні рішення оребрених труб у пучку

Номер пучка	1	2	3	4
Схема компоування пучка	<pre> o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o </pre>	<pre> o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o </pre>	<pre> o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o </pre>	<pre> o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o o-o-o-o-o-o </pre>
(орієнтація ребра, рис. 12)	а) а)	б) б)	а) б)	б) а)

Нагрів тритрубного робочого елемента здійснювався трьома послідовно сполученими електронагрівачами (ТЕН), рівного електричного опору. Зазор між ТЕНами і внутрішніми стінками труб заповнювався кварцовим піском. Блок живлення калориметрів забезпечував регулювання і контроль потужності, що підводилася. Вимір потужності ТЕНів виконувався лабораторними амперметрами

АСТ 0,5 і вольтметрами АСТВ 0,5. Для виключення пульсації напруги в подаючому ланцюзі встановлювався стабілізатор напруги. Вимір температур повітряного потоку на вході і виході робочої ділянки, на поверхні ребер і труб здійснювався термопарною установкою з 30 мідь-константанових термопар. Точність виміру температур складала $\pm 0,1$ °С. Термопари були задалегідь апробовані на ідентичність показань в ізотермічних умовах. Вимір термо-ЕДС здійснювався цифровим мілівольтметром PICOTEST 3500a. Для виключення тепловтрат через робочу ділянку було використано теплоізоляцію ПСБ-С завтовшки 50 мм. Швидкість потоку повітря на виході з робочої ділянки визначалася за допомогою цифрового анемометра Techno Ea-3010, а статична різниця тиску на кордонах робочої ділянки за допомогою мікроманометра ММН 240 (5) – 1,0.

При проведенні теплотехнічних випробувань було використано метод повного теплового моделювання при стаціонарному тепловому потоці, а середні значення коефіцієнтів тепловіддачі 1-3 і 4-6 рядів було отримано перестановкою калориметричних рядів труб у досліджувану зону. Прийняті значення поперечного $S_1 = 46$ мм і подовжнього $S_2 = 46$ мм кроків труб в пучках обрані, виходячи з допустимого зниження значення коефіцієнта ефективності сталевих ребер при найбільшому дослідному значенні швидкості повітря. Швидкість повітря в «живому» перетині робочої ділянки варіювалася в діапазоні $1 \div 6$ м/с.

Для підвищення точності експериментів питома теплове навантаження, віднесене до зовнішньої поверхні оребреної труби, підтримувалося постійним і складало 310 Вт/м². Результати теплових та аеродинамічних випробувань пучків труб представлені робочими залежностями вигляду $\alpha_k = f(\omega_{ж.п})$ і $\Delta P = f(\omega_{ж.п})$ на рис. 13 і 14.

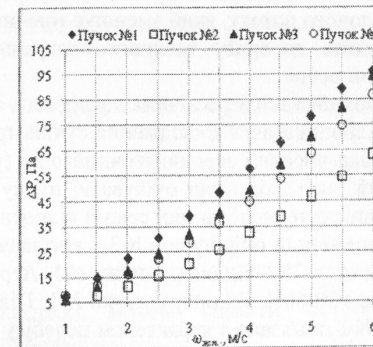
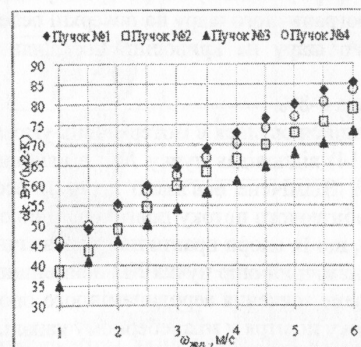


Рис. 13 Графіки залежності $\alpha_k = f(\omega_{ж.п.})$ Рис.14 Графіки залежності $\Delta P = f(\omega_{ж.п.})$

Експеримент показав, що тепловіддача пучка №2 в середньому складала 92% від значень тепловіддачі пучка №1. Коефіцієнти тепловіддачі для пучків №1 і 4 практично рівні, не дивлячись на те, що компоувки труб у пучках кардинально відрізнялися. Спостережуване явище можна пояснити обраними схемами обтікання

пучків №1 і 4. Для пучка №1 обтікання поверхні теплообміну потоком повітря відбувається, по суті, по криволінійному каналу, утвореному двома сусідніми ребрами. За рахунок цього виникає неоднорідність перебігу повітря на протилежних стінках криволінійного каналу, що призводить до подальшого підвищення локальних градієнтів тиску і відповідно коефіцієнтів тепловіддачі. Компонівка пучка №4 дозволяє добитися порівнянної теплової ефективності з пучком №1 за рахунок того, що на перших трьох рядах потік повітря втрачає на подолання аеродинамічного опору меншу кількість енергії. Таким чином, глибинні ряди (4,5 і 6 ряд), які мають таку ж саму компоновку, що і пучок №1, працюють з більшою тепловою ефективністю. Теплові характеристики пучка №3 є найгіршими. Коефіцієнт тепловіддачі пучка №3 складає в середньому 86% від значень коефіцієнта тепловіддачі пучка №4. Для пояснення отриманого результату необхідно звернути увагу на конфігурацію пучка №3 (див. табл.1). Перебіг потоку повітря у перших 3-х рядах труб пучка №3 відбувається у криволінійному міжреберному каналі (рис.1а), а на 4-ом ряду пучка відбувається вхід потоку в міжреберний канал іншої конфігурації (рис.1б). Перехід від течії потоку повітря у криволінійному каналі на течію у міжреберному каналі іншої конфігурації призводить до зниження інтенсивності теплообміну за рахунок того, що, відчувши значний аеродинамічний опір на перших рядах, омиваюче середовище набігає на глибинні ряди пучка №3 при менших локальних значеннях швидкості.

Результати зіставлення досліджених пучків труб показали, що кращі теплові показники відповідають пучку №1 з криволінійним міжреберним каналом, орієнтованим уздовж потоку повітря. Розбіжність значень коефіцієнта тепловіддачі для гіршого (пучок №3) і кращого (пучок №1) пучків склала ≈16%. Вищі значення коефіцієнта тепловіддачі пучка №1 обумовлені формуванням у міжреберному каналі пульсуючого потоку, який зменшує товщину пограничного шару на поверхні ребер і призводить до зриву теплового пограничного шару на криволінійних ділянках поверхні ребра.

Похибка теплотехнічних досліджень склала 5-8%.

Аеродинамічні дослідження пучків труб здійснювалися в ізотермічних умовах. Найбільш високий аеродинамічний опір (рис.14) відповідав пучку №1, а найбільш низький, як і слід було очікувати, пучку №2. Відмічено пов'язано перш за все з орієнтацією теплообмінних секцій відносно набігаючого потоку повітря. Оцінюючи аеродинамічний опір пучків №3,4 відзначасмо, що їх опори практично рівнозначні і складають ≈ 75% від опору пучка №1. Аеродинамічний опір пучка №2 найменший і складає ≈50-60% від опору пучка №1. Підвищене значення аеродинамічного опору пучка №1 пов'язано з характером перебігу потоку повітря у міжреберному каналі. У пучку №1 перебіг потоку відбувається у міжреберному криволінійному каналі, а в пучку №2 перебіг потоку відбувається до обмивання поверхні з традиційним поперечним оребренням, але з вираженим обтіканням круглої труби по еліпсу, за рахунок кутового розташування ребра.

Пучки №3 і 4 є «комбінованими» варіантами компоновок труб, в яких поєднуються аеродинамічні характеристики пучків №1 і 2.

Похибка аеродинамічних досліджень склала 3-5%.

Результати теплових і аеродинамічних випробувань пучків труб, узагальнені залежностями вигляду:

$$\alpha_k = C_1 \cdot \omega_{ж.п.}^m, \alpha_{прив} = C_2 \cdot \omega_{ж.п.}^n, \Delta P = z \cdot C_3 \cdot \omega_{ж.п.}^p \quad (4)$$




де α_k – конвективний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); $\alpha_{прив}$ – приведений коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); $\omega_{ж.п.}$ - швидкість потоку повітря у живому перетині, м/с; ΔP – аеродинамічний опір, Па; z- кількість повздовжніх рядів труб у пучку, шт.

Значення коефіцієнтів C_1, C_2, C_3 і показників ступені m, n, p рівнянь (4) для досліджених пучків приведені в таблиці. 2. Область використання отриманих рівнянь можна прийняти по графіках (рис. 13,14) і характеристиках пучків труб, приведених в таблиці 1.

Табл. 2 Коефіцієнти та показники ступені рівнянь (4)

№ пучка	C ₁	C ₂	C ₃	m	n	p
1	44.29	31.78	1,241	0.358	0.341	1,476
2	37.57	31.54	0,697	0.411	0.304	1,484
3	37.4	25.74	1,028	0.414	0.402	1,509
4	43.89	32.32	1,11	0.345	0.318	1,389

Табл. 3 Поверхні теплообміну, які широко використовуються у промисловості

Поверхня	№ пучка	Коефіцієнт оребрення β	Крок ребер u, мм	Діаметр труби d, мм	Висота ребра h, мм
	5	5,98	8	42	15
	6	19,9	2,56	25	15
	7	17,68	3,65	15x30	22

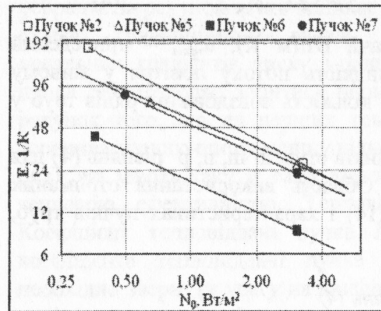
Досконалість теплообмінної поверхні можна оцінити енергетичним коефіцієнтом, який визначався згідно з виразом:

$$E = \alpha_k / N_0, 1/K \quad (5)$$

де $N_0 = \Delta P \cdot V / F_n$ – питома витрата потужності на транспорт повітря, Вт/м².

Порівняння енергетичної ефективності кращого з досліджених в даній роботі пучка №2 і пучків №5-7 представлено на рис.15. Результати порівняння свідчать, що у всьому дослідженому діапазоні швидкостей потоку повітря (2÷6.4 м/с) кращі показники енергетичної ефективності відповідають пучку №2.

Енергетична ефективність пучка №2 в межах зміни $N_0=0,25\div 2,43\text{Вт/м}^2$ на 36-7,4% вища, ніж в пучків № 5, 6 і на 75-68% вища, ніж в пучка №7.



Зіставлення за питомими витратами енергії досліджених поверхонь з поверхнями, які широко використовуються в промисловості (табл.3), підтвердило переваги запропонованого типу оребреної поверхні тепловідводу.

Рис. 15 Порівняльна оцінка ефективності пучків №2, 5-7

ВИСНОВКИ

1. В результаті комплексного експериментального і чисельного моделювання доведена енергетична доцільність удосконалення теплообмінної поверхні апаратів повітряного охолодження за рахунок кутової посадки ребер на круглу трубу.
2. Встановлено, що підвищення теплової ефективності поверхні теплообміну при використанні оребрення з нахилом зберігається до певного значення кроку ребер ($u = 6 \text{ мм}$), перевищення якого призводить до нівелювання позитивного ефекту.
3. З урахуванням компактності, теплових й аеродинамічних характеристик апарату визначено раціональний діапазон значень кута нахилу ребер відносно осьової лінії труби $\gamma = 45^0\div 60^0$.
4. Встановлено, що перехід апаратів повітряного охолодження на криволінійну конфігурацію міжреберного каналу забезпечує підвищення середньоінтегрального значення швидкісного потоку повітря по перетинах каналу і відповідно коефіцієнтів тепловіддачі.
5. Обґрунтовано, що використання запропонованої теплообмінної поверхні у пучках труб апаратів повітряного охолодження можливе як у вигляді окремих оребрених труб, так і пакету труб, насадженого на суцільне насадне ребро.
6. Отримано розрахункові залежності для визначення тепловіддачі й аеродинамічного опору коридорних пучків труб при різних компоновальних рішеннях апарату.
7. Використання запропонованої теплообмінної поверхні в апаратах повітряного охолодження забезпечує підвищення енергетичної ефективності у середньому на 7...30 %.
8. Застосування труб із ребрами з нахилом дозволяє за однакової кількості переданого тепла і витрати потужності на транспортування охолоджуючого середовища поліпшити об'ємні показники пучків труб на 70 %.

XV 1289
ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Стоянов П.Ф. Совершенствование поверхностей теплообмена аппаратов воздушного охлаждения/ Стоянов П.Ф., Лагутин А.Е.// Материали І Міжнародної науково-технічної конференції "Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації" Частина II: м. Миколаїв, 5-6 листопада 2008 р. – с.162-164
Особистий внесок автора: проведено експериментальне дослідження одиночних оребрених труб з похилим оребренням, оброблені результати експерименту.
2. Стоянов П.Ф. Совершенствование теплообменных систем в технологиях охлаждения и нагрева газов/ Стоянов П.Ф., Лагутин А.Е.// Холодильная техника і технологія, 2009, №1(117), с. 9-14
Особистий внесок автора: проведено експериментальне дослідження одиночних ребристих елементів і оребрених труб з похилим оребренням, обґрунтовано прийнятний кут посадки ребер і діапазон кроку оребрення, визначено передбачуваний ефект при використанні запропонованого виду оребрених труб.
3. Pavlo Stoianov Improvement of finned heat-exchange compressor surfaces/ Pavlo Stoianov , Anatolii Lagutin // Proc. of the Conference "Compressors-2009". - 2009. - Papiernička (Slovak Republic). - P. 398-403
Особистий внесок автора: проаналізовано результати експериментального дослідження поверхонь теплообміну, проведено тепловізію дослідження температурного поля одиночних ребер.
4. Стоянов П.Ф. Удосконалення оребрених поверхонь в апаратах охолодження та нагріву повітря/ Стоянов П.Ф., Лагутін А.Ю.// Материали ІV Всеукраїнського науково-технічного семінару "Удосконалення малої хладотеплотехніки і забезпечування нею технологічних процесів", м. Донецьк, 14-16 травня, 2009 р.– с.9-10
Особистий внесок автора: проведено експериментальне дослідження одиночних ребристих елементів, обґрунтовано принцип вибору прийнятного кута посадки ребер і діапазону кроку оребрення, сформульовано рекомендації щодо проектування поверхонь із похилим оребренням .
5. Стоянов П.Ф., Лагутін А.Ю., Гоголь М.І. Патент на корисну модель №40389 "Теплообмінний пучок" від 10.04.2009.
Особистий внесок автора: проведено експериментальне дослідження ребристих елементів, оброблені та проаналізовані результати, підготовлені матеріали для подання заявки на здобуття патенту на корисну модель.
6. Стоянов П.Ф., Лагутін А.Ю., Гоголь М.І. Патент на корисну модель №48588 "Теплообмінник повітряного охолодження" від 25.03.2010.
Особистий внесок автора: виконано патентний пошук та підготовлені матеріали для подання заявки на здобуття патенту на корисну модель.
7. Стоянов П.Ф. Численное моделирование обтекания поперечно оребренной поверхности теплоотвода/ Стоянов П.Ф., Лагутин А.Е.// Холодильная техника і технологія, 2010, №2(124), с. 35-41

Особистий внесок автора: виконано чисельне моделювання обтікання ребрених поверхонь із похилим оребренням, виявлено вплив геометричних параметрів і конструктивного виконання на тепло-аеродинамічні характеристики.

8. Стоянов П.Ф. Численное исследование омывания потоком воздуха ребристо-трубчатой поверхности теплообмена/ Стоянов П.Ф., Лагутин А.Е.// Матеріали І Міжнародної науково-технічної конференції "Інновації в суднобудуванні і океанотехніці", м. Миколаїв, 15-17 вересня, 2010 р.

Особистий внесок автора: розроблено методику проведення комп'ютерного моделювання обтікання ребрених поверхонь потоком теплоносія, досліджено структуру потоку у міжреберному каналі при варіюванні конструктивного виконання.

9. Стоянов П.Ф. Тепло-аэродинамические характеристики поперечно-ребренных пучков труб/ Стоянов П.Ф., Лагутин А.Е.// Холодильна техніка і технологія, 2010, №4(126), с. 28-33

Особистий внесок автора: експериментально досліджено різні компоновальні рішення труб у пучках, виконано зіставлення поверхонь теплообміну по тепло-аеродинамічних і енергетичних показниках, визначено фактори, які впливають на теплову ефективність ребристих труб з похилим оребренням.

АНОТАЦІЯ

Стоянов П.Ф. Удосконалення теплообмінних поверхонь апаратів повітряного охолодження. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування. – Одеська державна академія холоду. Одеса 2011.

Робота присвячена питанню удосконалення теплообмінних поверхонь апаратів повітряного охолодження. Запропоновано нове конструктивне рішення трубчатореберної поверхні теплообміну, яке поєднує особливості формування місцевих турбулізаторів потоку і властивостей легкообтічних тіл. Проаналізовано вплив різних геометричних параметрів на теплові і аеродинамічні характеристики поверхні теплообміну, виявлені закономірності впливу кута нахилу і кроку ребер. Експериментально отримані робочі рівняння по тепловіддачі і аеродинамічному опору пучків труб залежно від компоновок і швидкісних умов набегаючого потоку повітря.

За допомогою чисельного моделювання вивчена структура потоку в міжреберному каналі при варіюванні конструктивних параметрів оребрення, динаміка зміни швидкісних характеристик. Перевірена адекватність застосування розрахункової моделі для оцінки обтікання ребристих поверхонь теплообміну потоком теплоносія. Доведена енергетична перевага запропонованого конструктивного рішення ребреної поверхні теплообміну, сформульовані рекомендації щодо розробки та розрахунку поверхонь даного типу.

Ключові слова: поверхня теплообміну, похиле оребрення, інтенсифікація теплообміну, аеродинаміка, енергетична ефективність, легкообтічність.

АННОТАЦИЯ

Стоянов П.Ф. Усовершенствование теплообменных поверхностей аппаратов воздушного охлаждения. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования. – Одесская государственная академия холода. Одесса 2011.

Работа посвящена вопросу усовершенствования теплообменных поверхностей аппаратов с воздушным охлаждением. Предложено новое конструктивное решение трубчато-ребристой поверхности теплообмена, которое совмещает особенности формирования местных турбулизаторов потока и свойств удобообтекаемых тел. Основная идея при создании отмеченных поверхностей заключалась в организации благоприятных условий обтекания поверхности теплообмена и создании упорядоченного распределения потока воздуха по глубине пучка оребренных труб. Проанализировано влияние различных геометрических параметров на тепловые и аэродинамические характеристики поверхности теплообмена, выявлены закономерности влияния угла наклона и шага ребер. Проведенные экспериментальные исследования одиночных ребристых элементов позволили обосновать диапазон приемлемого угла наклона ребер относительно осевой линии трубы γ и допустимые шаги оребрения u . Экспериментально исследованы 6-ти рядные коридорные пучки труб. Выполнено сравнение теплоотдачи и аэродинамического сопротивления начальных и глубинных рядов при комбинированных компоновочных решениях пучков труб и различной ориентации наклонного оребрения относительно набегающего потока воздуха. Получены рабочие зависимости по расчету теплоотдачи и аэродинамического сопротивления пучков труб.

В результате применения методов численного моделирования изучена структура потока в межреберном канале при варьировании конструктивных параметров оребрения, динамика изменения скоростных характеристик. Оценена степень возмущенности потока в межреберном канале в зависимости от геометрических параметров. Проверена адекватность применения расчетной модели для оценки обтекания ребристых поверхностей теплообмена. Установлено, что переход к криволинейной конфигурации межреберного канала позволяет улучшить скоростное поле в канале. В ходе сравнительной оценки исследованных в данной работе поверхностей теплообмена с существующими аналогами доказано энергетическое преимущество предложенной конфигурации ребристой поверхности. Сформулированы рекомендации относительно разработки и расчета поверхностей данного типа.

Ключевые слова: поверхность теплообмена, наклонное оребрение, интенсификация теплоотдачи, аэродинамика, энергетическая эффективность, удобообтекаемость.

ABSTRACT

Stoianov P.F. Improvement of air cooling heat exchange surfaces. - Manuscript.

Thesis for a candidate's degree of technical science in 05.05.14 – Refrigerating, vacuum and compressor technique, air conditioning. - Odessa State Academy of Refrigeration. Odessa 2011

This thesis is dedicated to improvement of air cooling heat exchange surfaces. New constructive decision of fin-and-tube surfaces which combines features of formation local flow energizer and properties of streamlined bodies was offered. Influence of various geometrical parameters on thermal and aerodynamic characteristics of heat exchange surfaces was analyzed. Acceptable fin inclination angle and range of fin pitch were proved according to the received experimental results. The working equations for heat transfer and flow friction characteristics of tubes with inclined fins depending on configurations and high-speed conditions of incident airflow were experimentally received. The numerical research has allowed investigating structure of airflow in intercostals space at changing of geometric parameters of heat exchange surfaces. Enhancement factors of thermo-hydraulic characteristics of heat transfer surfaces with inclined fins were determined on the basis of the computer modelling results. Energy advantage of offered fin-and-tube heat exchange surfaces was experimentally proved. Recommendations relative to development and calculation of new type finned surfaces were formulated.

Keywords: heat exchange surface, inclined fin, intensification heat transfer, aerodynamics, energy efficiency, streamlined.