

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**АГЄЄВ КОСТЯНТИН ВАЛЕРІЙОВИЧ**

УДК 666.1.031.2/.6:66.042.882.2

**РЕКУПЕРАТИВНІ ТЕПЛООБМІННИКИ  
НА ОСНОВІ СТРУМИННО–ВИХРОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ  
В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ ТА АПАРАТАХ**

05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеському національному політехнічному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Денисова Алла Євсїївна**,  
Одеський національний політехнічний університет,  
кафедра теплових електричних станцій та  
енергозберігаючих технологій, завідувач кафедри

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Петраш Віталій Дем'янович**  
Одеська державна академія будівництва і архітектури,  
кафедра опалення, вентиляції та охорони повітряного  
басейну, завідувач кафедри

доктор технічних наук, доцент  
**Куріс Юрій Володимирович**  
Запорізька державна інженерна академія,  
кафедра металургії чорних металів, професор

Захист відбудеться 28 грудня 2015 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.04 у Одеському національному політехнічному університеті за адресою:

65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1, ауд. 22-ттл.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1.

Автореферат розісланий 27 листопада 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



д.т.н., професор Баласанян Г.А.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Основними споживачами природного газу у національній економіці України є гірничо-металургійний комплекс, хімічна та нафтохімічна промисловість, машинобудування. Плавильні та нагрівальні печі промислових підприємств є одними з найбільш крупних споживачів палива. За даними Міністерства промислової політики України, у передкризовий час споживання природного газу в прокатному виробництві складало 1,2 млрд м<sup>3</sup>. Такі ж об'єми, з яких значна частина використовувалася у нагрівальних і термічних печах, споживалися на підприємствах машинобудування. Більшість печей мають низький термічний ККД (15...25 %), що обумовлено великими втратами теплоти з відхідними продуктами згоряння (50...60 % теплоти, що підводиться). Економічне зростання України до 2008 р. базувалося на застарілих виробничих структурах й визначалося кон'юктурою короткострокового характеру на зовнішніх ринках хімічної і металургійної продукції – основних товарних групах українського експорту. Проте в даний час високовитратні й капіталомісткі заходи з економії енергоносіїв (перехід з мартенівського виплавлення сталі на конвертерний процес, часткова заміна природного газу пиловугільним паливом, введення систем безперервного лиття заготовок, використання внутрішніх енергоресурсів) не підкріплені бюджетним фінансуванням і перекладаються на оборотні кошти суб'єктів господарювання. Тому необхідні маловитратні енерготехнологічні заходи, що є економічно рентабельними навіть в умовах перманентної економічної кризи. Згідно «Галузевої програми енергоефективності і енергозбереження на період до 2017 р.» Мінпромполітики – це підвищення ефективності використання палива шляхом рекуперативної утилізації теплоти внутрішніх енергоресурсів тощо. Термін окупності компактних теплообмінників має складати менше одного року.

Незважаючи на те, що загальні закономірності процесів рекуперативної утилізації теплоти відомі, рішень щодо інтенсифікації теплових процесів, які передбачають збільшення температури дуття й одночасного суттєвого зменшення габаритів рекуператорів, явно недостатньо. Дослідження, що спрямовані на підвищення ефективності використання рекуператорів, потребують комплексного підходу щодо особливостей перебігу теплових і гідродинамічних процесів та схемно-конструктивних параметрів, бо тільки з урахуванням усіх впливових чинників можна приймати раціональні інженерно-технічні рішення.

Теоретичні та практичні засади для моделювання процесів у рекуператорах були закладені і розвинені відомими вченими, такими як Губинський В.І., Майстренко О.Ю., Семікін Й.Д., Тайц Н.Ю., Тебеньков Б.П., Сабуров Е.М., Карп І.М., Сорока Б.С., Жовтянський В.А. та ін. Перспектива використання раціональних конструкцій рекуператорів актуальна, тому що, відповідно Закону України «Про енергозбереження», призводить до економії первинних енергоресурсів і, як наслідок, покращує стан довкілля.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є створення наукових основ щодо використання новітніх пристроїв – струминно-вихрових рекуператорів для теплотехнічних агрегатів з активними гідрогазодинамічними режимами, що приведе до підвищення ефективності промислового виробництва. Для з'ясування перспектив використання струминно-вихрових рекуператорів для підвищення ефективності утилізації внутрішніх енергоресурсів технологічних процесів виконано критичний аналіз стану енерготехнологій в гірничо-металургійному комплексі, хімічній і нафтохімічній промисловості, машинобудуванні та визначено шляхи і методи економії енергоресурсів за рахунок інтенсифікації процесів теплообміну на повітряній стороні теплообмінника, а також шляхом раціонального його конструювання, що може призвести до додаткового корисного ефекту – суттєвого зменшення габаритів апарата. Аналіз досліджень цього питання викладено в розділі 1 роботи.

На основі узагальнення результатів експериментальних досліджень струминно-вихрових рекуператорів для теплотехнічних агрегатів з активними гідрогазодинамічними режимами (вихрові топки, камери згоряння, сепаратори) визначено впливові чинники, які призводять до підвищення питомої ефективності теплообмінного апарату при одночасному зменшенні його метало- та ресурсоемності, й габаритів відповідно. Основні результати досліджень на аеродинамічному стенді викладено в розділі 2 дисертації.

На основі фізичного та імітаційного моделювання процесів витікання ударних (імпактних) струменів (impinging jets) та формування з них у робочому просторі струминно-вихрового рекуператора, завдяки закручуванню, сформованого потоку повітря, що нагрівається, встановлено особливості процесів формування нерухомими лопатями у формі гвинтової крильчатки (ГК) загального вихрового спірального руху, для якого на аеродинамічному стенді експериментальним шляхом визначено вхідні та вихідні параметри потоку, а також реалізовано CFD-моделювання газодинамічних процесів у робочому просторі рекуперативного трубчастого теплообмінника для різних схемно-конструктивних рішень та різних температурних умов, що відповідають змінним режимам експлуатації. Аналіз та узагальнення результатів CFD-моделювання роботи струминно-вихрового теплообмінника щодо параметрів потоку на повітряній стороні рекуператора викладені в розділі 3 роботи.

Аналіз техніко-економічних характеристик струминно-вихрового рекуператора представлений у розділі 4 дисертації.

Таким чином, науково-технічна задача, яка вирішується в роботі, спрямована на підвищення ефективності теплових і гідродинамічних процесів у струминно-вихрових рекуператорах для теплотехнічних агрегатів з активними гідрогазодинамічними режимами, що призводить до суттєвого корисного підвищення ефективності конвективного теплообміну на повітряній стороні металевих трубчастих рекуператорів та до зменшення їх габаритів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана відповідно до Закону України «Про енергозбереження», за напрямком «Енергетична стратегія України на період до 2030 р.» та у рамках ДБ НДР Міністерства освіти і науки України № 33-41 (0111U006721) «Ефективні технології генерації та споживання енергоресурсів». Етап 3. «Економічна та екологічна ефективність інтегрованих систем енергозабезпечення за міжнародними стандартами» (2013–2014 рр.).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення ефективності утилізації теплоти енерготехнологічних об'єктів за рахунок інтенсифікації процесів теплообміну в струминно-вихровому рекуператорі.

*Для досягнення поставленої мети було сформульовано такі задачі:*

- виконати аналіз ефективності використання технології імпактних струменів для інтенсифікації процесів теплообміну в рекуператорах теплотехнічних агрегатів з активними гідрогазодинамічними режимами (циклонних та вихрових) та встановити чинники, що призводять до одночасного зменшення габаритів рекуператорів за рахунок покращення аеродинамічних характеристик;

- запропонувати технологію підвищення ефективності утилізації тепла в металевих трубчастих рекуператорах з урахуванням інтенсифікації конвективного теплообміну на повітряній стороні, що призводить до додаткового корисного ефекту – збільшення температури підігріву дуття з одночасним зниженням металоємкості та габаритів теплообмінників у 2...3 рази;

- виконати експериментальні дослідження роботи струминно-вихрових рекуператорів на фізичній моделі, яка відрізняється тим, що перфорована по спіралі повітряна труба з ГК належить до окремого класу вихрових систем з активними гідрогазодинамічними режимами, на відміну від традиційних завихрювачів циклонних апаратів;

- розробити CFD-модель струминно-вихрового рекуператора, виконати числове моделювання параметрів його роботи на основі даних експериментальних досліджень,

фізичного, імітаційного моделювання на фізичній моделі, на підставі чого розробити рекомендації для практичного використання струминно-вихрових рекуператорів на засадах енергозберігаючих технологій;

– встановити техніко-економічні переваги запропонованої конструкції струминно-вихрових рекуператорів теплотехнічних агрегатів з метою енерго- та ресурсозбереження.

**Об'єктом дослідження** є рекуперативні теплообмінники, що працюють на основі струминно-вихрової технології на засадах енергозберігаючих технологій.

**Предметом дослідження** є процеси конвективного теплообміну та пов'язані з ними гідрогазодинамічні процеси в просторових спіральних вихрових структурах, що формуються на повітряній стороні струминно-вихрового рекуператора, при змінних температурних та експлуатаційних умовах, що визначають питому ефективність теплообмінного апарату та конструктивні особливості з урахуванням аеродинамічних опорів рекуператора.

**Методи дослідження.** Методи оцінки ефективності роботи теплообмінників на основі загальнофізичних уявлень, імітаційне та фізичне моделювання аеродинамічних процесів у робочому просторі рекуператора на фізичній моделі. Отримані результати не суперечать висновкам відомих теорій.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

– запропоновано науково-технічні засади та інструментарій щодо прогнозування і практичної реалізації умов, які підвищують ефективність теплообмінних процесів на повітряній стороні рекуператорів, як традиційних, так і струминно-вихрових, шляхом управління параметрами аеродинаміки апаратів з урахуванням їх конструктивних особливостей;

– запропоновано модель роботи струминно-вихрової системи як системи двох взаємодіючих спіральних просторових вихрів: вихру, що виникає під дією імпульсних струменів, та вихру, що формується нерухомими ГК, а також фізичну модель взаємодії двох вихрів, аналогом якої є дві струни, що коливаються з різними частотами та періодами, взаємно підсилюючи чи пригнічуючи одна одну, або утворюючи осциляції;

– встановлено, що за характером аеродинамічних процесів, пульсацій енергії та спіральних траєкторій течії у робочому просторі рекуператора струминно-вихрова технологія та теплотехнічні рішення на її основі відрізняються від традиційних процесів у циклонних теплотехнічних агрегатах і утворюють новий клас вихрових систем з активними гідрогазодинамічними властивостями;

– на основі теоретичного та експериментального фізичного, імітаційного та CFD-моделювання роботи струминно-вихрового рекуператора одержані залежності для оцінки впливу окремих типів аеродинамічних опорів на ефективність роботи рекуператора, що є підставою щодо вибору схемно-конструктивних рішень для теплотехнічного обладнання на основі струминно-вихрової технології.

#### **Результати роботи впроваджені:**

– на підприємстві ТОВ «ЕВРОСЕДІА», Київська область, Україна та у науково-виробничій лабораторії ОНПУ «Енергозберігаючі технології», в якості рекомендацій до проектування теплообмінних апаратів на засадах енергозберігаючих технологій;

– використовуються у курсовому і дипломному проектуванні студентів спеціальностей 7.05060101, 8.05060101 «Теплоенергетика» та 7.05060105, 8.05060105 «Енергетичний менеджмент» ОНПУ;

– включені до звіту ДБ НДР 33–41 (0111U006721) «Ефективні технології генерації та споживання енергоресурсів», 2014–2015 рр., Міністерства освіти і науки України.

**Особистий внесок здобувача** полягає у формулюванні мети і завдань дослідження, у критичному аналізі технології імпульсних струменів та сучасних тенденцій конструювання рекуперативних теплообмінників. Особистим внеском автора є запропонована струминно-вихрова технологія для підвищення ефективності рекуперації теплоти та схемно-конструктивні рішення щодо рекуперативного теплообмінника, та з урахуванням експериментальних

досліджень, аналіз та узагальнення теоретичних та експериментальних результатів. На основі струминно-вихрової технології отримано 1 патент на винахід.

**Апробація результатів дисертації:**

– Науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів із застосування інформаційних технологій в енергетиці з доповіддю на тему «Фізичне моделювання і числове дослідження роботи трубчастого теплообмінника з активними перфорованими вставками і оребренням для підвищення енергоефективності пічних агрегатів», м. Київ (Україна), 15–16 січня 2014 р.;

– XIV Міжнародна науково-технічна конференція «GRE'2014» з доповіддю на тему «Аеродинамічні характеристики струминно-вихрового рекуператора», Опольський технічний університет, м. Бельсько Бяла (Польща), 16–18 червня 2014 р.;

– VI (XLVI) Міжнародна науково-практична конференція «Науковий прогрес : Досягнення і цілі» з доповіддю на тему «Інтенсифікація рекуперативного підігріву повітря в теплообмінниках з активними вставками для підвищення енергоефективності пічних агрегатів», м. Горловка (Україна), 19–20 червня 2014 р.;

– Міжнародна конференція «Міждисциплінарність як тенденція сучасної науки» з доповіддю на тему «Холодний стенд для дослідження роботи металевих рекуператорів з активними вставками для підвищення енергоефективності пічних агрегатів», Науково-інформаційний центр «Знання», м. Донецьк (Україна), 14 червня 2014 р.;

– V Міжнародна науково-практична конференція магістрантів, аспірантів та науковців «CFD-моделювання роботи струминно-вихрового рекуператора», Одеська державна академія будівництва і архітектури (ОДАБА), м. Одеса (Україна), 12–13 грудня 2014 р.;

– Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології» з доповіддю на тему «Рекуперативні теплообмінники на основі струминно-вихрової аеродинамічної схеми», Одеська національна академія харчових технологій (ОНАХТ), м. Одеса (Україна), 21 квітня 2015 р.;

– XLIX наукова конференція молодих дослідників ОНПУ з доповіддю на тему «Струминно-вихрові теплообмінники», Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса (Україна), 25 травня 2015 р.;

– XI Міжнародна науково-практична конференція «Новітні досягнення європейської науки — 2015» з доповіддю «Струминно-вихрові рекуператори як промислові теплотехнічні агрегати з активними гідрогазодинамічними режимами», ООД «БялГРАД-БГ», м. Софія (Болгарія), 17–25 липня 2015р.;

— XXIII Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології : Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD-2015)» з доповіддю «Струйно-вихрові рекуператори для печних агрегатів хімічних производств в контурі металургічного комбіната», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків (Україна), 20–22 травня 2015 р.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 13 наукових робіт, з них: 6 у наукових фахових виданнях України (3 одноосібно), 3 статті у журналах, які входять до наукометричних баз даних, 1 патент на винахід та 6 тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

**Структура і об'єм роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Роботу викладено на 190 стор., з них 48 рисунків на 16 стор., 2 таблиць на 2 стор., список літератури – 148 джерел на 13 стор. та 4 додатки на 49 стор.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, викладено наукову новизну і практичну цінність, представлено апробацію результатів та особистий внесок здобувача у виконаній роботі.

**Перший розділ** присвячений аналізу сучасних методів і тенденцій конструювання рекуперативних теплообмінників для технологічних процесів, шляхам і методам підвищення їх ефективності. Показано, що для утилізації тепла відхідних газів у печах можливе використання двох методів: рекуперация і регенерація тепла (рис. 1). Розглянуто рекуперативний підігрів повітря як метод підвищення енергоефективності у технологічних процесах, який, зокрема, забезпечує економію палива, розширює можливості їх використання, підвищує термічний ККД печей. Показано, що рекуперативне підігрівання повітря забезпечує зменшення витрати палива залежно від температури, дозволяє використовувати низькокалорійні палива. Таким чином, можна зробити висновок про те, що рекуперативний підігрів дуття є одним з рентабельних сучасних методів підвищення енергоефективності плавильних і нагрівальних печей промислових підприємств як одного з найбільш крупних споживачів палива.

Перевагами систем рекуперативної утилізації тепла відхідних газів є відносна простота у порівнянні з регенераційною системою, більш низькі капітальні вкладення та простота обслуговування рекуператорів. Показано неможливість створення єдиної конструкції рекуператора, що визначається різноманітністю парку печей, виконуваних ними завдань і температурних режимів їх експлуатації. Правильний вибір метода утилізації тепла димових газів для конкретного пічного агрегату дає можливість здійснювати управління енерговитратами підприємства, збільшує термін експлуатації пічного агрегату і самого рекуператора.

Найбільш перспективною щодо інтенсифікації конвективного теплообміну в металевих рекуператорах є технологія використання імпульсних струменів, яка універсальна стосовно охолодження або нагріву цільової поверхні. При струминному натіканні повітря на теплообмінну поверхню інтенсивність тепловіддачі збільшується у 2...4 рази у порівнянні з іншими методами інтенсифікації теплообміну при однакових витратах енергії та ступенях підігріву повітря.



Рис. 1. Ступінь енергозбереження при використанні попереднього підігріву повітря в рекуператорах різного типу.

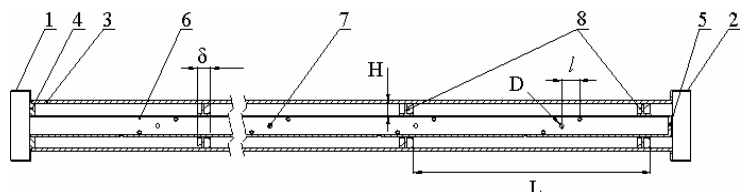


Рис. 2. Струминно-вихровий рекуператор: 1 — вхідний повітряний короб; 2 — вихідний повітряний короб; 3 — нагрівна труба; 4 — вхідна перфорована кришка; 5 — заглушка; 6 — внутрішня повітряна труба; 7 — отвори-сопла; 8 — лопаті у формі гвинтової крильчатки.

Для узагальнення результатів патентного пошуку щодо теплообмінників та на основі уявлень про режим теплообміну в печах (рекуператорах) та інших конвективно-радіаційних енерготехнологічних агрегатах запропоновано класифікацію рекуператорів за аеродинамічною схемою: рух повітря усередині труби круглого (фасонного) перетину, обдування пластини струменями з перфорованої насадки, витікання струменів з отворів у трубній циліндричній стінці, закручування потоку струменів внутрішнім оребренням, виступами та фасонними частинами, формування багатозаходного потоку повітря. На основі критичного аналізу аеродинамічних схем рекуператорів запропоновано конструкцію струминно-вихрового рекуператора (рис. 2). Показано, що управління аеродинамікою роботи теплообмінника на повітряній стороні є інструментом підвищення ефективності теплообміну конвекцією.

У другому розділі розглядаються методи досліджень теплотехнічних агрегатів з активними гідрогазодинамічними режимами та розробка адекватної аеродинамічної моделі для визначення параметрів роботи струминно-вихрових рекуператорів на основі теоретичних уявлень про вихровий просторовий спіральний рух теплоносія.

Найбільш перспективним з точки зору практичного застосування теорії вихрів є експериментальне та математичне дослідження вихрових спіральних структур та їх стійкості. З існуючих апаратів максимальну ефективність мають пристрої з активними гідрогазодинамічними режимами – циклонні та вихрові. Аналіз використання цих пристроїв на підприємствах галузі показав, що вони за технологічними і техніко-економічними показниками значно перевершують теплообмінники інших типів аналогічного призначення.

Перевагою вихрових теплотехнічних агрегатів (вихрові топки, камери згоряння, сепаратори, рекуперативні теплообмінники та ін.), що працюють в активних гідрогазодинамічних режимах, є їх висока питома ефективність при зниженій металоємкості, а також зменшені габарити. Одна з найбільш важливих особливостей цих пристроїв – значна залежність ефективності їх роботи від режимних та конструктивних параметрів. Перспективною конструкцією рекуператорів з активними гідрогазодинамічними режимами є струминно-вихровий рекуператор. В основу його роботи покладений ефект синергії від спільної роботи системи імпульсних струменів, що формують вихрову спіральну структуру руху нагрітого повітря по всій довжині теплообмінника, та їх додаткового закручування і турбулізації лопатями у формі гвинтової крильчатки (ГК). Але існуючі методики непридатні для розрахунків струминно-вихрової конструкції рекуператора, тому що його конструктивні та температурні параметри ускладнюють дослідження в цьому напрямку. Особливістю роботи струминно-вихрових рекуператорів, згідно з теорією концентрованих вихрів, є формування системи вихрових шнурів  $f$  (рис. 3) за несиметричним струменем, який витікає у зносячий потік. З урахуванням нестабільності вихрових спіральних структур практичний інтерес має теорія концентрованих вихрів, яка заснована на узагальненні та систематизації дослідних даних.

Згідно цієї теорії, найбільш характерними є збурення гвинтової або спіральної форми, широко розповсюджені в природі і техніці, а вивченню процесів з вихровим прецесуючим ядром (гвинтової форми) у даний час приділяється велика увага. Дані експериментів показують, що вихрові нитки відхиляються від прямолінійної траєкторії руху внаслідок властивості вихрового ядра бути провідником збурень; у процесі існування вихрових структур спостерігається явище розпаду вихрів. Вказані особливості формування і існування вихрових спіральних структур у струминно-вихровому рекуператорі роблять неможливим створення числового опису його роботи на основі уявлень про процеси, що відбуваються у вихрових або циклонних системах. Тому для дослідження складних турбулентних процесів, що протікають на повітряній стороні рекуператора струминно-вихрової конструкції, на початковому етапі було прийнято рішення про створення фізичної моделі (аеродинамічного холодного стенду) для виміру граничних умов для подальшого математичного CFD-моделювання струминно-вихрового теплообмінника та імітаційного моделювання струминно-вихрової системи за допомогою вдування у робочий простір кольорового диму та повітря. Установка є фізичною моделлю (ФМ)

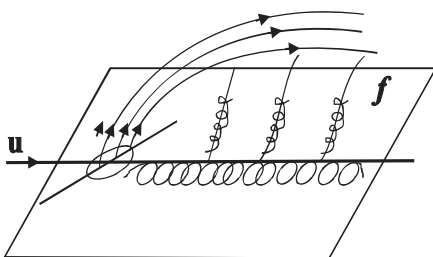


Рис. 3. Схема формування вихрових шнурів.

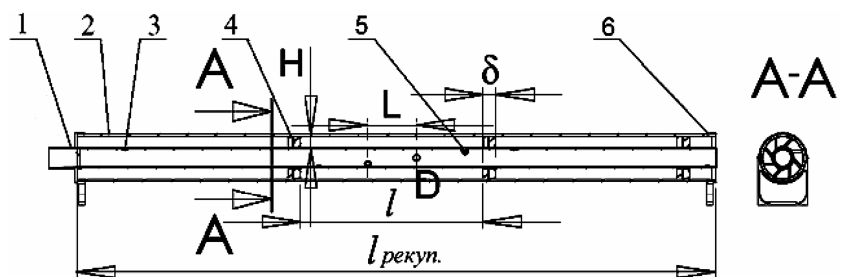


Рис.4. Конструкція струминно-вихрового рекуператора.



рекуператора з вимірювальною апаратурою та обчислювальним блоком. Фізична модель складається з двох коаксіально зібраних труб (зовнішня 2 та внутрішня 3), виготовлених з оргскла (Plexiglas); при цьому внутрішня труба 3 має спіральну перфорацію соплами круглої форми 5. Для з'єднання труб та придання жорсткості, а також підключення вимірювального устаткування на вході та виході коаксіально розташованих труб встановлена вхідна кришка 1 з боковим патрубком і підставкою та вихідна кришка з підставкою 6. У внутрішньому просторі фізичної моделі встановлені нерухомі лопаті у формі гвинтової крильчатки 4, виготовлені з ABS-пластика методом об'ємного стереолітографічного прототипування (3D-друк) з допусками до 0,1 мм при мінімальній шорсткості (рис. 4).

При подачі повітря у внутрішню перфоровану у вигляді спіралі вставку використовувався цифровий диференційний манометр-термоанемометр DT-8920 з трубкою Піто-Прандтля для вимірювання диференційного тиску, надлишкового повного тиску, температури та розрахування швидкості та об'ємних витрат, а також імпульсний анемометр MS6252B з функцією вимірювання температури, швидкості потоку та об'ємних витрат повітря до температури 50 °С. Вимірювання вказаних характеристик потоку проводилося тим же приладом DT-8920. Прилади через USB-порт підключають до ПК, щоб фіксувати дані вимірів у режимі реального часу у програмному середовищі. Технічні характеристики вимірювальної техніки наведені в табл.1.

**Таблиця 1** – Технічні характеристики термоанемометра DT-8920

Одиниці	Діапазон	Дискретність	Похибка
<b>Тиск</b>			
Pa (Па)	5 000	1	± 0,3 % від діапазона при 25 °С
Максимально допустимий тиск	50 000 Па		
Повторюваність	± 0,2 % (макс. ± 0,5 % від діапазона)		
Лінійність/гістерезис	± 0,29 % від діапазона		
Час відгуку	0,5 с		
<b>Швидкість</b>			
m/s (м/с)	10,00...80,00	0,01	± 2,5 % при 10 м/с
<b>Температура</b>			
°С	0,0...+50,0	0,1	± 1°С

Аеродинамічний стенд (фізична модель рекуператора) працює так. На вхід з нагнітача подається повітря зі швидкістю понад 20 м/с, яке поступає у повітряну перфоровану трубу 3 з кроком між соплами L. Повітря, що подається, при проходженні внутрішньою повітряною трубою 3 при витіканні з перфорації 5 формує турбулентний вихор з досліджуваних імпульсних струменів, аеродинамічні характеристики яких, як граничні умови для подальшого CFD-моделювання, необхідно отримати в результаті експериментів. Імпульсні струмені взаємодіють із зовнішньою трубою діаметром D аеродинамічного стенду, яка моделює нагріту стінку зовнішньої труби рекуператора. При цьому відбувається дисипація струменів, розбиття на вихрові флуктуації, викривлення траєкторії та ін.

Сформований при витіканні повітря з внутрішньої повітряної перфорованої труби турбулентний вихор проходить уздовж зазору H між внутрішньою перфорованою по спіралі трубою та зовнішньою трубою фізичної моделі рекуператора. Уздовж внутрішньої перфорованої по спіралі труби 3 розташовані ГК, що забезпечують додаткову турбулізацію сформованого вихру. Для забезпечення фото- або відеофіксації роботи стенду та процесів турбулізації струменів, що витікають з перфорованих сопл, і протікають у його робочому просторі, формування сумарного турбулентного вихру з імпульсних струменів і додаткового закручування при натіканні спільного турбулентного вихру на стінку зовнішньої труби 2 у робочий простір стенду подавали дим, що генерується димовою машиною Chauvet Hurricane 700.

Димом є аерозоль, отриманий сублімацією до пароподібного спеціального концентрату («fog fluid»), що є нетоксичним і негорючим розчином гліцерину у воді з подальшим розпилюванням крізь сопло дим-машини.

Оскільки струминно-вихрова конструкція рекуператора на повітряній стороні передбачає високу компактність для забезпечення підвищених питомих показників, прогноз ефективності рекуператора на основі близького до оптимального взаємного розташування круглих сопел був проведений за номограмою для сукупності круглих сопел (рис. 5) залежно від параметрів взаємного розміщення сопел: співвідношень діаметрів сопел  $D$ , кроку між соплами  $L$ , зазору між перфорованою трубою і стінкою  $H$ , що нагрівається,  $f$  – площі сопел.

Для вирішення завдання просторового розміщення сопел і визначення опору внутрішньої повітряної труби (генератора імпульсних струменів) і первинного генератора вихрового спірального руху в робочому просторі струминно-вихрового рекуператора, не можуть бути застосовані стандартні методики розрахунків металевих трубчастих рекуператорів. Номограма оптимізації струминної системи для круглих сопел (рис. 5) є проекцією на площину просторової тривимірної поверхні відношення середніх коефіцієнтів тепловіддачі  $\bar{\alpha}$  до максимальних середніх коефіцієнтів  $\bar{\alpha}_{\max}$  для деякої температури нагріву зовнішньої стінки рекуператора і просторового взаємного розміщення сопел.

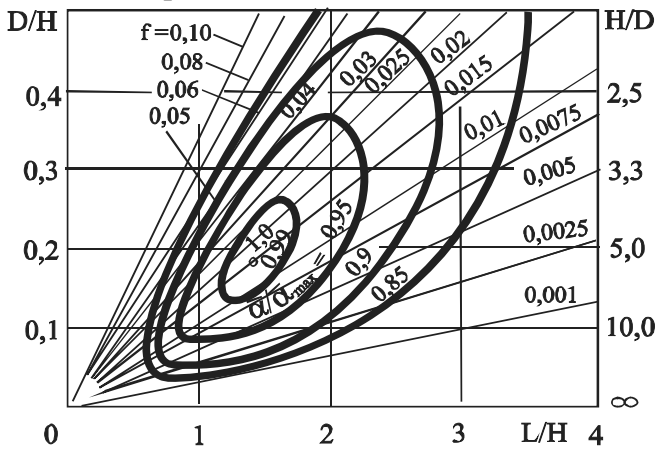


Рис. 5. Номограма оптимізації струменевої системи для теплообмінників

Аналіз номограми (рис. 5) дає можливість прогнозувати діапазон співвідношень  $H/D$  і  $L/H$ , враховуючи площу сопел (фактично теоретично можливу витрату повітря). Так, із збільшенням площі сопел збільшенні витрати повітря, максимальне співвідношення  $\bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{\max} \sim 0,95$  може бути досягнуто при  $H/D = 2-11$  і  $L/H = 1-2,8$ . Досяжний на практиці показник  $\bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{\max} \sim 0,85$  (ефективність 85%) показує, що рекуператори на основі технології імпульсних струменів можуть застосовуватися у найширшому діапазоні розмірів сопел, витрат повітря і діаметрів труб.

Для запропонованої струминно-вихрової технології, окрім визначення форми, діаметрів сопел та їх розміщення, істотний вплив на ефективність рекуперації тепла надаватиме наявність нерухомого оребрення у формі ГК, яке забезпечує додаткове закручування турбулізованого потоку нагрітого повітря, отже можливе підвищення ефективності такої системи до 0,9–0,95. Проте, таке підвищення ефективності накладатиме деякі обмеження на область параметрів  $H/D$  і  $L/H$ , зсуваючи їх до  $H/D \leq 3 \dots 4$  та  $L/H \leq 1 \dots 2,5$ . Збільшення параметра  $H$  несприятливо впливатиме на роботу нерухомого оребрення, оскільки велика висота ГК сприятиме при їх обтіканні прояву ефектів, що спостерігаються при обтіканні крил літаків або ефектів кавітації за плоскістю гребного гвинта.

Вимірювання параметрів повітряного потоку проводилося окремо для входу і виходу аеродинамічного стенду. Час одного виміру складав 100 с, у тому числі 10 с роботи вимірювальної апаратури без підключення нагнітача повітря і 90 с після подачі повітря у робочу порожнину стенду при незмінних параметрах перфорованої вставки і розташування оребрення, з частотою запису даних 1 с. Вимір диференціального тиску ( $P_{\text{diff}}$ ), надлишкового повного тиску ( $P_{\text{total}}$ ), температури та розрахунок швидкості (м/с) і об'ємної витрати ( $\text{м}^3/\text{мин}$ ) повітря проводилися циклічно по 3 рази для здобуття статистично достовірної вибірки даних і можливості усереднювання отриманих результатів вимірів. За даними вимірів були розраховані значення статичного тиску (статичного натиску) ( $P_{\text{stat}}$ ), масових (кг/с) і об'ємних ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) витрат повітря для стандартних умов (температура 20 °С, щільність повітря 1,2 г/м<sup>3</sup>).

Запропонована фізична модель для дослідження роботи струминно-вихрового рекуператора дозволяє при чисельному CFD-моделюванні забезпечити похибку розрахунків температури, відповідну погрішності вимірювальної апаратури.

**У третьому розділі** описано дослідження роботи струминно-вихрових рекуператорів та розробку математичного опису процесів на повітряній стороні.

Незважаючи на велику різноманітність типів і конструкцій циклонно-вихрових апаратів звичайні циклонні камери круглого поперечного перетину знайшли найбільше використання у різних галузях промисловості як нагрівальні та теплообмінні пристрої завдяки високій енергоефективності, певній простоті конструкції, надійності та компактним габаритним розмірам. Для таких пристроїв досяжні високі питомі експлуатаційні характеристики.

Забезпечення вихрового характеру процесів, що протікають у цих апаратах, пов'язане із значними витратами енергії. Наприклад, гідравлічний опір закрученого потоку може до 5 разів перевищувати його значення для течій без закручення.

Теорія вихрів як сукупність робіт, покликаних теоретично узагальнити спостережувані у природі та техніці процеси формування вихрових спіральних структур та перебігу, наприклад, смерчів і торнадо, які мають яскраво виражену гвинтову форму, використовує математичний апарат, який складно застосовувати для вирішення науково-практичних завдань, а також специфічну мову, не притаманну теплотехнічній науці.

Створення теорії вихрових процесів і відповідного математичного апарату як області досліджень залишається найменш вивченим. Можна говорити про створення декількох часткових теорій в області аеродинаміки потоку, які описують процеси, що протікають у вихрових апаратах, відповідно до конкретних конструкцій або до певного класу апаратів.

Математичні дослідження у теорії вихрів використовують таке основне поняття гідродинаміки (наукову абстракцію), як точковий вихор чи вихрова нитка, яка є простою моделлю реальних вихрів. На її основі можлива побудова математичних моделей складніших вихрових течій — моделі потоків з вихровою симетрією. При цьому з теорії вихрів при розгляді моделі руху системи вихрів усередині циліндра, що обертається, випливає важливий висновок про високу нестабільність вихрових спіральних утворень та систем вихрів ( $N > 3$ ).

Зважаючи на це, а також на значну кількість робіт, присвячених теорії вихрів, практичний інтерес може представляти теорія концентрованих вихрів, яка заснована на узагальненні та систематизації дослідних даних. Згідно цієї теорії, найбільш характерними є збурення гвинтової або спіральної форми, поширені у природі і техніці, тому вивченню процесів з вихровим ядром (вихром гвинтової форми) та його прецесії в даний час дослідники приділяють велику увагу.

Для придання потоку обертального руху і часткового закручування застосовують три групи завихрювачів: тангенціальні, які надають закручуваному потоку обертальний рух за рахунок тангенціального або равликового підведення потоку (рис. 6); аксіальні, що надають потоку одночасно обертальний та осьовий рух; протяжні, що забезпечують закручування потоку за всією довжиною каналу вихрового пристрою.

Складена номограма (карта) режимів розпаду вихрів у таких координатах: параметр  $Re$  та співвідношення висоти (довжини) вихрової труби до її радіуса  $R$ . Узагальнення результатів досліджень параметрів розпаду вихрової структури було проведене для вертикальної вихрової камери, де спіральні вихрові структури формуються дном, що обертається, як генератором завихрень (рис. 7).

Номограма непрямым чином підтверджує, що всі реальні течії в техніці фактично є турбулентними, а самі турбулентні течії як сукупність хаотичних флуктуацій, завихрень і дисипацій потоку в деякій області можуть бути наслідками розпаду вихрової структури по несиметричній за віссю моделі при  $Re > 3000$  та  $H/R > 3-4$ .

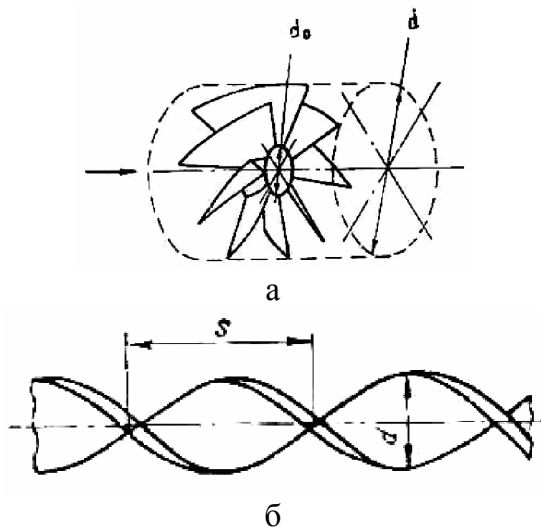


Рис. 6. Типи завихрювачів, що використовують у циклонних апаратах: а — аксіально-лопасний; б — стрічковий.

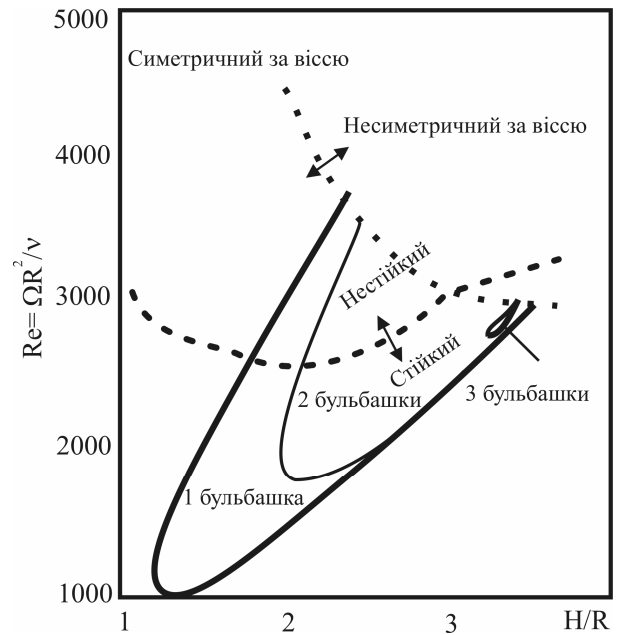


Рис. 7. Карта режимів розпаду вихра для експериментів у ємкості з кришкою, що обертається.

Методики розрахунків циклонних пристроїв, що існують на сьогоднішній день, на основі аеродинамічних уявлень про вихровий потік в основному є напівемпіричними методиками, отриманими за рахунок узагальнення експериментальних даних, які дозволяють апроксимувати величину тепловіддачі до стінок вихрової камери такою узагальненою залежністю:

$$Nu = C Re^n,$$

де  $C$  і  $n$  — напівемпіричні коефіцієнти.

Для встановлення глибинного взаємозв'язку між аеродинамічними та розрахунковими тепловими параметрами струминно-вихрової системи, відповідно до теорії подібності, для узагальнення масиву експериментальних даних застосовувалися комплекси – критерії подібності  $Nu$  и  $Re$ . Залежність між ними була представлена у вигляді ступеневої функції  $Nu = C Re^n$ . Ця критеріальна залежність представленого виду була одержана для сукупності  $Nu$  и  $Re$  дослідних даних, що представлені у логарифмічних координатах після логарифмування (критеріальне рівняння виду  $\lg Nu = \lg C + n \cdot \lg Re$ ) апроксимацією поліномом першого ступеня за методом найменших квадратів.

Для певних випадків у рівняння апроксимації додається співмножник  $Pr^C$ , де  $C$  – постійний коефіцієнт, що залежить від умов роботи вихрового пристрою та його геометрії. Розглянуті методи розрахунку набули найбільшого поширення у зв'язку з використанням рівнянь руху турбулентного потоку.

Числові дослідження і CFD-моделювання для всіх конструкцій фізичної моделі було проведено у SolidWorks з установкою максимальної точності моделювання, що відповідає програмному обмеженню у 8 циклів по  $\sim 239$  ітерацій розв'язків рівняння Нав'є-Стокса. Основним допущенням при створенні чисельної моделі роботи струминно-вихрового рекуператора конструкції було припущення про те, що характер ліній струму і кути виділення імпульсних струменів зберігатимуться при різних температурах нагріву зовнішньої труби.

Температура нагріву зовнішньої нагрівної труби варіювалася у діапазоні 100–400 °C з кроком 100 °C. На ФМ також проводилася візуалізація процесів, що протікають у системі, введенням у робочий простір ФМ білого диму з розчину на основі гліцерину, вироблюваного спеціалізованою димовою машиною Chauvet Shurrricane 700 (виробництво США), що використовується у кіноіндустрії для створення ефектів. Імітаційне моделювання процесів у ФМ проводили для різних варіантів конструктивного виконання ФМ по числу перфорованих сопел і ГК.

В SolidWorks Flow Simulation рух та теплообмін середовища моделювали з допомогою рівнянь Нав'є-Стокса, що описують закони збереження маси, імпульсу та енергії середовища у нестационарній постановці задачі:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0,$$

$$\frac{\partial (\rho u_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_k} = S_i,$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho E + P) u_k + q_k - \tau_{ik} u_i + \frac{\partial}{\partial x_k} = S_k u_k + Q_H,$$

де  $t$  – час;  $u$  – швидкість текучого середовища;  $\rho$  – густина текучого середовища;  $P$  – тиск текучого середовища;  $S_i$  – зовнішні масові сили, що діють на одиничну масу текучого середовища:  $S_{i\text{pirous}}$  – дія опору пористого тіла,  $S_{i\text{gravity}}$  – дія гравітації,  $S_{i\text{rotation}}$  – дія обертання системи координат;  $S_i = S_{i\text{pirous}} + S_{i\text{gravity}} + S_{i\text{rotation}}$ ;  $E$  – повна енергія одиничної маси текучого середовища;  $Q_H$  – тепло, що виділяється тепловим джерелом у одиничному об'ємі текучого середовища.

Крім того, використовували рівняння стану компонентів текучого середовища та емпіричні залежності для в'язкості та теплопровідності цих компонентів. Для моделювання турбулентних течій рівняння Нав'є-Стокса піддавали осередненню за параметром  $Re$ . Таким чином, використовували усереднений вплив турбулентності на параметри потоку при малому часовому масштабі, а для тиску, швидкостей, температури тривалі зміни враховували шляхом введення відповідних похідних за часом. Для замикання отриманої системи рівнянь в SolidWorks були застосовані рівняння переносу кінетичної енергії турбулентності та її дисипації у рамках так званої  $k$ - $\epsilon$  моделі турбулентності.

Аналіз характеру зміни швидкості, температури повітря й числа  $Pr$  показує, що характер виділення імпульсних струменів і траєкторій турбулізованого вихру цих струменів у формі просторової спіралі однакові для розрахунків 300 і 1500 ітерацій. Різниця температур повітря на виході струминно-вихрового рекуператора для цих розрахунків знаходиться у діапазоні похибки використаного для вимірювання граничних умов CDF-моделі цифрового дифманометра DT-8920. Тому подальші експерименти щодо розрахункових досліджень струминно-вихрових рекуператорів обмежили 300...400 ітераціями.

Формування зони локального розігрівання повітря 1 (рис. 9) у зазорі між зовнішньою нагрівною трубою і внутрішньою повітряною перфорованою трубою на «початковій» ділянці моделі рекуператора пов'язано з формуванням зворотних вихрів. Формування вихрового потоку з просторовою спіральною структурою не спостерігається на цій ділянці, навпаки, формуються локальні зони перегрітого повітря, які з часом з'єднуються у протяжний фронт 2 з полем температур 530–690 К.

При аналізі характеру розподілу температур повітря на подовжньому розрізі рекуператора видно, що потік у робочому просторі є спіральною вихровою структурою, синусоїдою з великим періодом та «розмазаними» максимумами, що є локальними зонами 3 з високими температурами розігрівання повітря (до 690 К). Ці «максимуми» розташовані дзеркально відносно струменів, що беруть участь у їх формуванні. Імпульсні струмені 4 з цих сопел потрапляють у подовжній вертикальний розріз CFD-моделі; вони виразно видні завдяки своїй низькій температурі відносно спільного нагрітого потоку.

Дослідження роботи струминно-вихрового рекуператора з активними гідрогазодинамічними режимами проводилося на фізичній моделі (холодному стенді) з подальшим CFD-моделюванням процесів теплообміну на повітряній стороні рекуператора в науково-практичному комплексі SolidWorks Flow Simulation. Фізична модель була виконана в компоновці, згідно конструкції рекуператора, з оргскла, 1–4 шт. ГК з ABS-пластика, розташовані рівномірно уздовж внутрішньої повітряної перфорованої по спіралі труби.

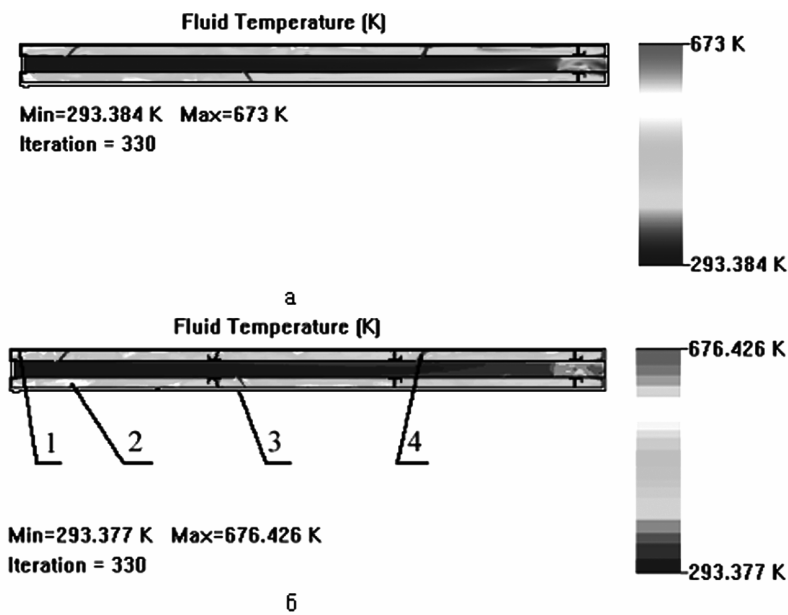


Рис. 9. Структура вихрових турбулізованих потоків у робочому об'ємі CFD-моделі струминно-вихрового рекуператора ( $H/D \leq 3$ ) при температурі нагріву зовнішньої стінки  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

перерізі симетрію, близьку за формою до синусоїди відносно осі рекуператора з «розмазаними» максимумами, та одночасною появою локальних зон нагріву в них. При цьому спіральна структура (синусоїда траєкторій ліній струму) виглядає «рваною», а не цілісною просторовою спіраллю, що має проміжки. Близька до правильної синусоїдальна симетрія траєкторій руху нагрітого повітря формується з підвищенням числа ГК. На рис. 9, б чітко видно «максимумами» із зонами розігрівання, що чергуються, і «мінімумами» з температурами нагріву повітря  $300\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При збільшенні числа ГК спостережується циклічність ліній струму (синусоїда) в об'ємі, що є просторовою спіральною вихровою структурою, розпадається на локальні зони розігрівання, сконцентровані безпосередньо за ГК. Якщо об'єднати ці локальні зони розігрівання, то можна побачити, що частота екстремумів синусоїди підвищилася при збільшенні числа ГК.

При аналізі сукупності розрахункових кривих (рис. 10) процес можна бачити, як фрактал двох взаємозв'язаних і впливаючих одна на одну систем: системи імпульсних струменів і сформованої з них системи спіральних просторових вихрових структур. Так, на графіку радіальних швидкостей можна бачити максимуми (гострі піки) швидкості, відповідні моменту виділення імпульсного струменя з сопла, і в точці екстремуму — відповідні удару об нагріту поверхню. Одночасно на деяких графіках піки мають зрізані максимуми, що відповідають моменту проходження імпульсного струменя уздовж нагрітої стінки CFD-моделі. Інші криві мають досить плавний (параболічний) вихід на максимум швидкості (удар об нагріту стінку) і більшу площу під кривою у порівнянні з графіками, що мають гострі, злегка зрізані списи екстремумів.

Параболічні криві починають з'являтися при довжині струменів у діапазоні  $0,6\text{--}0,8\text{ м}$ , при довжині струменів  $0,8\text{--}1,2\text{ м}$  спостерігається ущільнення кривих з максимумами. Криві розташовані настільки сконцентровано, що важко розрізнити їх приналежність до конкретних струменів: виникає немов би резонанс піків радіальної швидкості. Якщо максимуми радіальних швидкостей при довжині струменів до  $0,6\text{ м}$  знаходяться у діапазоні  $\leq 20\text{ м/с}$ , то для довжини струменів  $0,8\text{--}1,2\text{ м}$  спостерігаються пікові радіальні швидкості до  $30\text{ м/с}$ . Графіки радіальних швидкостей для різних струменів мають очевидну подібність. Появу більш пологих, параболічних кривих максимальних радіальних швидкостей можна пояснити таким чином. При

Аналізуючи температури і траєкторії нагрітого повітря при різних конструктивних виконаннях струминно-вихрового рекуператора можна відзначити, що при мінімальній кількості ГК (1 шт.) на початковій ділянці (на вході рекуператора у торцевій частині) за рахунок формування зворотних вихрових турбулізованих течій з'являється зона локального розігрівання повітря до температур  $500\text{--}600\text{ К}$  при температурі зовнішньої стінки рекуператора  $673\text{ К}$  (рис. 9, а). Дана зона підвищеного розігрівання присутня у всіх типах конструктивного виконання ФМ і мінімально займає близько  $1/3$  довжини теплообмінника.

Також можна спостерігати формування закрученого спірального потоку розігрітого повітря, що має у

аеродинамічному розрахунку діаметр сопла залежав від необхідної об'ємної витрати на вході у перфоровану повітряну трубу. Аеродинаміка виділення струменів з отворів у циліндровій стінці має істотні відзнаки від виділення струменів при обдуванні перфорованої пластини.

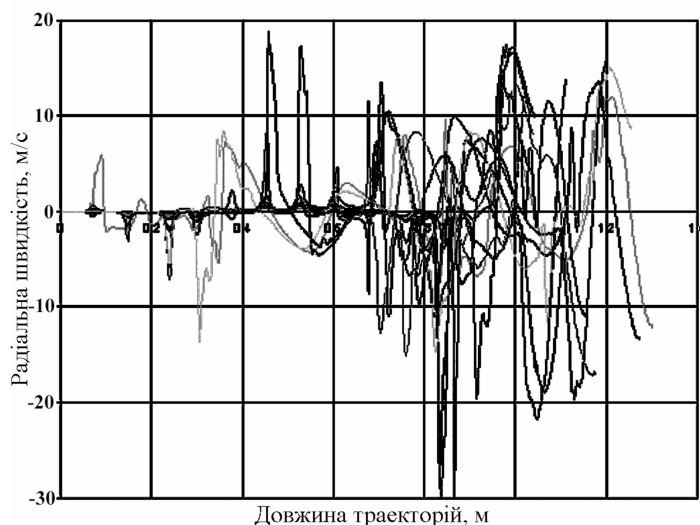


Рис. 10. Сукупності розрахункових кривих залежності радіальної швидкості від довжини струменя.

У діапазоні довжини струменів 1,0...1,2 м на графіку радіальної швидкості можна спостерігати широкі параболічні піки, що може свідчити про невеликий вклад останніх струменів по довжині рекуператора у розігрівання повітря, не зважаючи на виділення цих останніх струменів під кутами, близькими до  $90^\circ$ .

Наявність пульсацій параметра  $P_t$  показує, що характер процесів у струминно-вихровій системі, що відбуваються у ній, не підпадає під поняття вихрових труб і циклонних апаратів. Пульсації енергії можна спостерігати не лише у пристінній області, але й у ядрі – на стінках повітряної перфорованої труби. При цьому не можна

спостерігати однорідний градієнт температур ядра вихрового руху і пристінного вихра, як в апаратах на основі вихрового ефекту Ранка: пульсації (хвилі) можна спостерігати і в ядрі, і в пристінній області рекуператора.

Для аналізу процесів, що протікають на повітряній стороні струминно-вихрового теплообмінника при варіюванні температури нагріву зовнішньої стінки рекуператора і числа ГК, за даними CFD-моделей теплообмінників були отримані розрахункові параметри нагрітого повітря на виході з рекуператора (рис. 11).

Аналіз кривих рис.11 показує, що максимальна температура відхідного повітря спостерігається при виконанні ФМ з 2 та 3 ГК. При температурі стінки рекуператора 573 К криві 2 та 3 розходяться, різниця температур нагріву для них складає близько  $40^\circ\text{C}$ . Спостережену залежність можна пояснити на моделі, якщо представити формування спіральної просторової вихрової структури у струминно-вихровому рекуператорі як результуючу накладених коливань натягнутої струни.

Аналіз поведінки функції швидкості потоку повітря на виході з рекуператора (рис. 12) показує, що після досягнення нагрітою стінкою теплообмінника температури  $200^\circ\text{C}$  ( $473\text{ K}$ ) можна спостерігати підвищення крутизни графіка швидкості для конструкції ФМ з 4 та 1 ГК; максимальна швидкість на виході рекуператора прямо пропорційно пов'язана з температурою нагріву зовнішньої стінки рекуператора. При підвищенні цієї температури у діапазоні  $200\text{--}400^\circ\text{C}$  ( $473\text{--}673\text{ K}$ ) швидкість повітря, що відходить, досягає близько  $25\text{--}30\text{ м/с}$  та буде максимальною для рекуператора з 4 ГК. При цьому залежність швидкості від числа ГК не складає прямо пропорцію.

Швидкість на виході системи з 2 ГК буде вища, ніж для рекуператора з 3 ГК. Оскільки енергія потоку не лише підвищується за рахунок конвективного розігрівання повітря, але й витрачається на подолання місцевих аеродинамічних опорів (оребрень та шорсткості стінок), розподіл кривих пов'язаний з тим, що втрати швидкості на подолання опорів для системи з 2 ГК будуть меншими, ніж втрати для системи з 3 сопел, при цьому розігрівання потоку для 4 ГК буде достатнім для компенсації втрати швидкості на місцевих опорах.

Для системи з 3 ГК розігрівання спіральної вихрової структури у робочому просторі CFD-моделі не забезпечує підвищення швидкості потоку, аналогічне системі з 4 сопел.

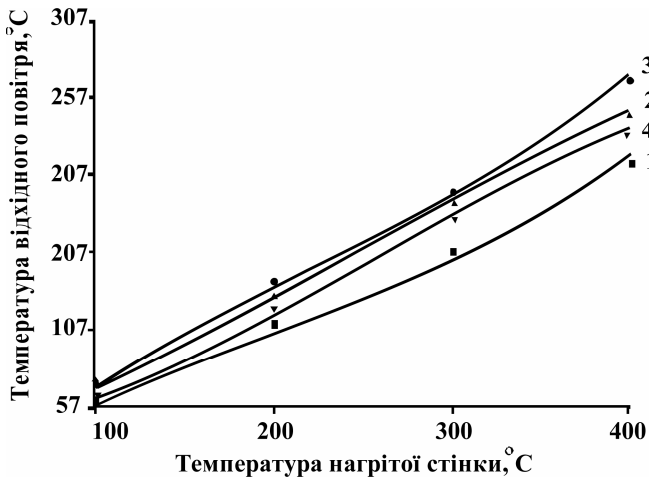


Рис. 11. Залежність температури відхідного повітря від температури нагрітої стінки рекуператора (номера кривих – число ГК).

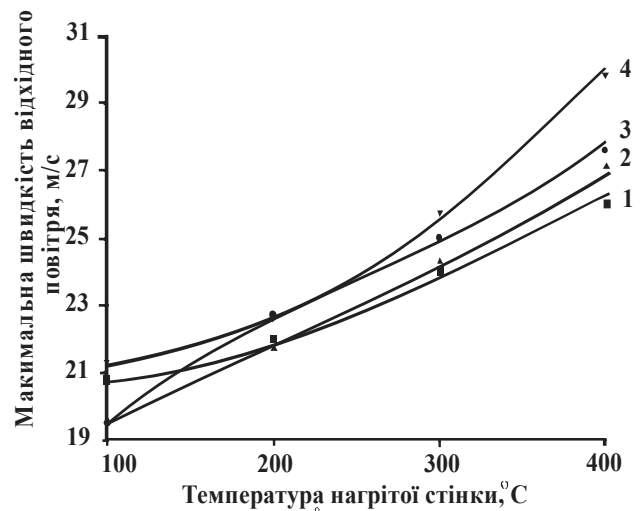


Рис. 12. Залежність максимальної вихідної швидкості нагрітого повітря від кількості сопел та температури стінки рекуператора (номера кривих – число ГК).

Потужність рекуператора як інтегральна характеристика теплових процесів у його робочому просторі підвищується із збільшенням числа ГК і температури нагріву зовнішньої стінки.

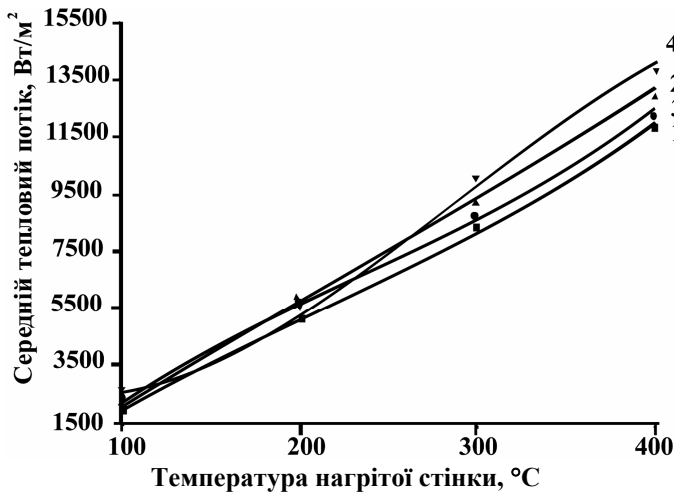


Рис. 13. Залежність осередненого теплового потоку  $Q$  від температури нагрітої стінки рекуператора (номера кривих – число ГК).

показують істотний вплив «хвилевої» складової, яка виникає в результаті взаємодії та накладення явищ, спричинених високою внутрішньою нестабільністю вихрового руху і здатністю вихрів генерувати збурення через особливості спіральної просторової структури.

Якщо представити замість вихру натягнуту струну, що коливається, то створювані її коливаннями хвилі матимуть певні показники амплітуди, періоду і частоти коливань, тобто струна пульсуватиме. За наявності декількох струн хвилі, що генеруються ними, осцилюватимуть, підсилюватимуть коливання одна одної, або пригнічуватимуть, якщо періоди коливань збігаються або знаходяться у протифазі.

Обробка даних числового CFD-моделювання аеродинаміки роботи струминно-вихрового рекуператора проводилася на основі розрахунку узагальнених критеріїв теорії подібності  $Nu$  і

Теплова потужність рекуператора підвищується із збільшенням числа ГК обертання і температури нагріву зовнішньої стінки та не схильна до впливу міри обертності, тобто не залежить від числа ГК у системі (рис. 13), що не протирічить гідродинамічній теорії, згідно якої коефіцієнт тепловіддачі пропорційний величині місцевих аеродинамічних опорів.

Висока ефективність роботи струминно-вихрового теплообмінника з активними гідрогазодинамічними режимами може бути досягнута за рахунок ефекту синергії між ефектами від різних конструктивних рішень. Аналізи результатів числового дослідження рекуператора пропонованої конструкції



Re без урахування критеріїв Pr та Gr, при цьому режим течії приймався як властивий технічним системам — турбулентним, а конвекція — вимушеною.

За результатами числового моделювання критеріїв Nu, Re для струминно-вихрових систем одержані розрахункові коефіцієнти C і n для критеріального рівняння (рис. 14)

$$Nu = 5,682 Re^{0,187}$$

Різкі локальні скачки Pr можна пояснити наявністю пульсаційних флуктуацій хвиль, що формуються одночасно імпульсними струменями у пристінній області і статичними ГК. Вихрові пульсації параметра Pr на поверхні внутрішньої повітряної перфорованої труби можуть бути пояснені на основі моделі формування концентрованих вихрів за струменем, що витікає у зносячий потік.

На подолання оребрення витрачається значна кількість енергії (швидкості) потоку. Можна передбачити, що накладення пульсацій енергії (швидкості) декількох сформованих у робочому просторі струминно-вихрового рекуператора вихрових спіральних структур є причиною того, що протяжні області розігрівання при збільшенні числа ГК дробляться на локалізовані за ГК оребрення розігріті турбулізовані флуктуації, що характерно для відриву турбулізованої течії при обтіканні так званого погано обтічного тіла, яке можна спостерігати в авіації при обтіканні крила літака.

Аналіз результатів CFD-моделювання показує, що ефективність тепловіддачі конвекцією зростає при збільшенні температури нагрітої стінки рекуператора і збільшенні числа ГК, потужність теплообмінника також зростає, оскільки збільшується значення коефіцієнта тепловіддачі, що прямо пропорційно залежить від місцевих аеродинамічних опорів рекуператора.

**У четвертому розділі** вирішується питання вибору адекватних коефіцієнтів для оцінки техніко-економічних показників струминно-вихрових теплообмінників як пристроїв нової конструкції та прорахунку ефективних інвестиційних рішень щодо впровадження цих теплообмінників для печей та інших енерготехнологічних агрегатів промисловості.

Зважаючи на рівень зносу основних засобів виробництва, який має тенденцію до постійного зростання (збільшився до 2010 р. до 61,8 %), а також враховуючи підвищення приблизно на 1/3 прогнозованого вжитку природного газу промисловістю України до 2030 р., за даними Інституту економіки і прогнозування НАНУ, вибір методики оцінки економічної ефективності впровадження струминно-вихрових рекуперативних теплообмінників, прогноз техніко-економічних показників їх роботи і економії газоподібного палива у печах з рекуператорами нової конструкції є актуальним науковим завданням.

Згідно теплотехнічних розрахунків, відомо, що при сталій температурі відхідних газів, яка залежить від типу пічного агрегату, палива та технологічного процесу, зростання температури підігріву повітря дуття можливе за умови зростання поверхні рекуператора. При цьому економія палива як показник енергоефективності для металевих трубчастих рекуператорів за умови нагріву теплообмінної поверхні до 400–600 °С для температури відхідних газів 600–1200 °С у термічних, нагрівних камерних печах та печах ділянок термічної обробки може досягати 30 %.

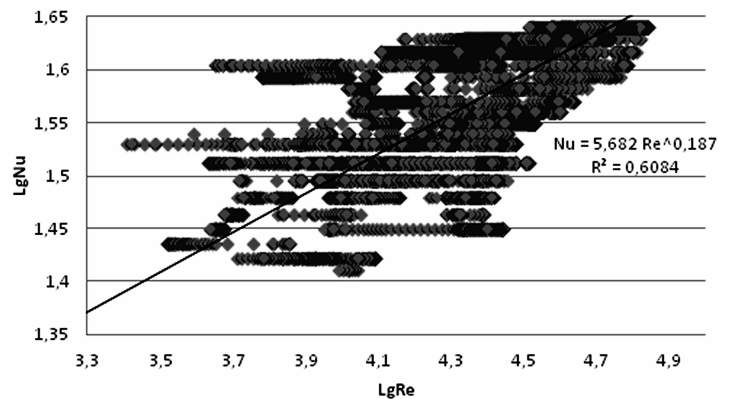


Рис. 14. Результати розрахунів коефіцієнтів критеріального рівняння.

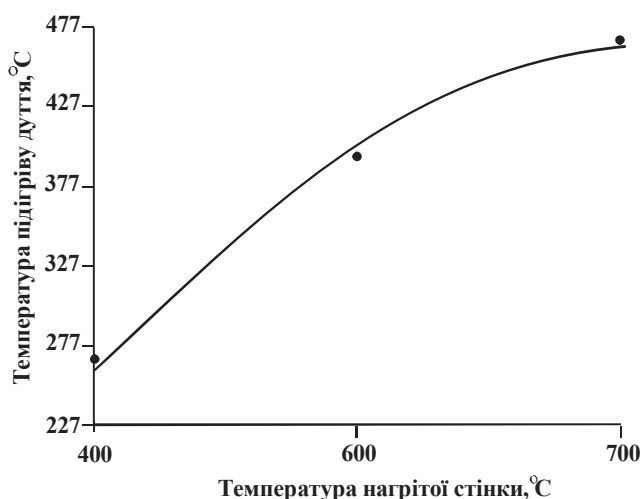


Рис. 15. Розрахункова залежність температури підігріву дуття у струминно-вихровому рекуператорі від температури зовнішньої стінки нагрівної труби на основі результатів CFD-моделювання.

застосування запропонованого струминно-вихрового рекуператора є доцільним при умові досягнення температур підігріву дуття  $\geq 500$  °C. З енергетичної точки зору для цього необхідне встановлення рекуператора у передтопках печей, у високотемпературному ізолюваному корпусі ззовні печі, у безпосередній близькості до блоків паликових пристроїв, а також виконання струминно-вихрових рекуператорів багато-заходними за димовими газами. Крім того, доцільним можна визнати послідовне з'єднання кількох теплообмінних секцій для нагріву повітря дуття до підвищених температур при температурі відхідного повітря 600–800 °C.

Вперше оцінку струминно-вихрового рекуператора було проведено за коефіцієнтом рівня техніки  $K_{ут}$  при різних способах конструктивного виконання теплообмінника та різній кількості ГК (рис. 16). Згідно методики оцінки  $K_{ут}$ , для найкращого варіанта конструкції  $K_{ут}$  має мінімальне значення.

Порівняння ефективності струминно-вихрових рекуператорів із трубчастими металічними рекуператорами традиційних конструкцій за коефіцієнтом рівня техніки  $K_{ут}$  показало стрибок цього коефіцієнта на порядок для струминно-вихрового теплообмінника, тобто виконується залежність  $K_{ут \text{ труб.рек}} \gg K_{ут \text{ струм-вихр.рек}}$ .

З точки зору ефективності інвестицій у струминно-вихрові пропозиції в промисловості для забезпечення прискореної окупності струминно-вихрових рекуператорів (до 1 року) доцільне їх використання для печей з великою садкою, великими витратами природного газу та якнайменшою вартістю струминно-вихрового рекуператора за рахунок масового типу виробництва, здешевлення матеріалів (застосування простих нелегованих сталей).

Більші температури підігріву дуття характерні для керамічних рекуператорів та регенераторів, впровадження яких пов'язане з необхідністю капітальної перебудови теплотехнічних пристроїв та є капіталомістким.

У рамках CFD-моделювання роботи струминно-вихрових рекуператорів було встановлено, що завдяки схемі складного протитоку між нагрівним повітрям та відхідними димовими газами теплообмінник може максимально розвинути потенціал енерго-ефективності струминно-вихрової конструкції на високотемпературних конвективно-радіаційних режимах теплообміну та радіаційних режимах (рис. 15).

На основі аналізу конструктивних рішень пічних агрегатів промисловості показано, що для більшості типів камерних печей, секційних нагрівних печей та печей для відпалу

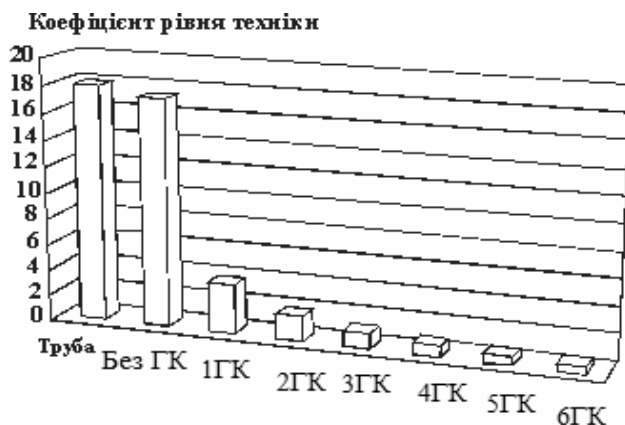


Рис. 16. Порівняння коефіцієнта рівня техніки  $K_{ут}$  для струминно-вихрового рекуператора різного конструктивного виконання та металевих трубчастих рекуператорів порівнянних габаритних розмірів без вставок.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі фізичного імітаційного моделювання та числового CFD-дослідження процесів у робочому просторі рекуперативного теплообмінника з активними гідрогазодинамічними режимами розглянуто питання підвищення ефективності утилізації теплоти енерготехнологічних об'єктів за рахунок інтенсифікації процесів теплообміну в струминно-вихровому рекуператорі. У відповідності з метою роботи були вирішені задачі дослідження та одержані такі результати.

1. На основі аналізу ефективності використання технології імпульсних (ударних) струменів для інтенсифікації процесів теплообміну в рекуператорах теплотехнічних агрегатів з активними гідрогазодинамічними режимами (циклонних та вихрових) встановлено, що існує оптимальний діапазон величин відстаней струменів – поверхня теплообміну, при якому удар струменя об поверхню відбувається так званім потенційним ядром (початкова ділянка) струменя, отже максимальне падіння швидкості струменя досягається у критичній точці, призводить до зростання чи турбулізації потоку і збільшення ефективності теплообміну конвекцією.

2. На основі аналізу конструкцій рекуперативних теплообмінників за їх аеродинамічною схемою як класифікаційною ознакою запропоновано струминно-вихрову аеродинамічну схему та відповідний струминно-вихровий теплообмінник, у якому завдяки інтенсифікації конвективного теплообміну на повітряній стороні та формуванню загального турбулізованого вихру імпульсних (ударних) струменів з його додатковим закручуванням ГК досягається додатковий корисний ефект – збільшення температури підігріву дуття до 300 °С на конвективному режимі з одночасним зниженням металоемкості та габаритів теплообмінників у 2...3 рази.

3. У результаті експериментальних досліджень на фізичній моделі, що виконана у вигляді повнорозмірного макету струминно-вихрового рекуператора з перфорованою по спіралі повітряною трубою і ГК, обгрунтовано, що запропонований теплообмінник належить до окремого класу вихрових систем з активними гідрогазодинамічними режимами, на відміну від традиційних завихрювачів циклонних апаратів.

4. На базі розробленої CFD-моделі струминно-вихрового рекуператора виконано числове моделювання параметрів його роботи на основі даних експериментальних досліджень, фізичного, імітаційного моделювання та запропоновано рекомендації щодо використання струминно-вихрових рекуператорів для підвищення енергоефективності теплотехнічних агрегатів промисловості за рахунок підігріву повітря дуття та зменшення температури відхідних димових газів.

5. Виконано техніко-економічну оцінку ефективності використання струминно-вихрових рекуператорів з метою енерго- та ресурсозбереження енерготехнологічних агрегатів та порівняння запропонованого типу теплообмінників із металевими трубчастими рекуператорами традиційної конструкції на основі коефіцієнта рівня техніки. Її оцінка показала, що завдяки розвиненій поверхні струминно-вихрової вставки, а саме: ГК та перфорованої по спіралі повітряної труби – ефективність струминно-вихрового рекуператора має перспективу до зростання при використанні на радіаційному режимі теплообміну у високотемпературних печах.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ (всього 13)

### • 3 Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Агеев, К.В. Современные тенденции конструирования металлических рекуператоров со вставками для повышения энергоэффективности печных агрегатов // Науковий вісник НЛТУ України. – 2014. – Вип. 24.5. – С. 155–169.

*Аналіз конструкції теплообмінників за їх аеродинамічною схемою як класифікаційною ознакою, запропоновано рекуператор на основі струминно-вихрової аеродинамічної схеми*

2. Агеев, К.В. Струйно-вихровые рекуператоры для энергосберегающих технологий / К.В.Агеев, А.Е.Денисова // Холодильна техніка та технологія. Енергетика та енергозбереження. – 2015. – № 51(4). – С. 76–82.

*Фізична модель для імітаційного фізичного моделювання і CFD-моделювання роботи струминно-вихрового рекуператора*

3. Агеев, К.В. Повышение эффективности работы рекуператоров для технологических агрегатов / К.В.Агеев, А.Е.Денисова // Вісник ДДТУ. – 2015. – Вип. 1 (26). – С. 173–180.

*Аналіз нестабільності спіральних вихрових просторових структур на основі теорії вихрів*

• **3 Статті у фахових виданнях України, що входять до наукометричних баз даних:**

4. Агеев, К.В. Рекуперативный подогрев воздуха как метод повышения энергоэффективности печных агрегатов / К.В.Агеев // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – № 3. – С. 25–33.

*Аналіз способів утилізації тепла енерготехнологічних агрегатів та конструкцій теплообмінників за їх енергоефективністю*

5. Агеев, К.В. Технология импактных струй в активных вставках рекуператоров для повышения энергоэффективности печных агрегатов / К.В.Агеев // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – № 4. – С. 21–27.

*Аналіз застосування технології імпактних струменів як перспективного способу інтенсифікації теплообміну в металевих трубчастих рекуператорах та оптимальних параметрів системи струменів*

6. Агеев, К.В. Струйно-вихревые рекуператоры как аппараты с активными гидрогазодинамическими режимами / К.В.Агеев, А.Е.Денисова // Энергетика : економіка, технології, екологія. – 2015. – № 2. – С. 113–122.

*Математичний опис процесів на повітряній стороні рекуператорів на основі струминно-вихрової технології*

• **6 Тез доповідей на міжнародних конференціях:**

7. Агеев, К.В. Физическое моделирование и численное исследование работы трубчатого теплообменника с активными перфорированными вставками и оребрением для повышения энергоэффективности печных агрегатов / К.В.Агеев // Тези доповідей XXXXIII Науково-технічної конференції «Моделювання». – Київ : Інститут проблем моделювання в енергетиці НАН України, 2014. — С. 29–30.

*Розробка експериментального аеродинамічного стенду для CFD-моделювання роботи трубчастого рекуператора з перфорованими вставками та оребренням*

8. Агеев, К.В. Интенсификация рекуперативного подогрева воздуха в теплообменниках с активными вставками для повышения энергоэффективности печных агрегатов / К.В.Агеев // Материалы VI (XLVI) Международной научно-практической конференции «Научный прогресс : достижения и цели», г. Горловка (Украина), 2014. — С. 1–3.

*Рекомендації щодо методів дослідження процесів на повітряній стороні струминно-вихрових рекуператорів*

9. Агеев, К.В. Холодный стенд для исследования работы металлческих рекуператоров с активными вставками для повышения энергоэффективности печных агрегатов / К.В.Агеев // Материалы международной конференции «Междисциплинарность как тенденция современной науки, Научно-информационный центр «Знание», 2014. – С. 25–27.

*Рекомендації щодо конструктивних особливостей фізичного стенду для дослідження теплообмінників специфічних конструкцій*

10. Агеев, К.В. Рекуперативні теплообмінники на основі струминно-вихрової аеродинамічної схеми / К.В.Агеев // Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології», Одеська національна академія харчових технологій (ОНАХТ), м.Одеса, 2015. – С. 101–102.

11. Агеев, К.В. Струйно-вихревые рекуператоры как промышленные теплотехнические агрегаты с активными гидрогазодинамическими режимами / К.В.Агеев, А.Е.Денисова //

Материалы XI Международной научно-практической конференции «Новейшие достижения европейской науки», ООД «БялГРАД-БГ», 2015. – С. 30–31.

*Визначення особливостей CFD-моделювання рекуператорів на основі струминно-вихрової аеродинамічної схеми*

12. Агеев, К.В. Струйно-вихревые рекуператоры для печных агрегатов химических производств в контуре металлургического комбината / А.Е.Денисова, К.В.Агеев // Тези доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференція «Інформаційні технології : Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD-2015)», Національний технічний університет «ХПІ», 2015. – С. 275.

*Визначення особливостей струминно-вихрової рекуперації теплоти енерготехнологічних агрегатів*

• **1 патент на винахід:**

13. Пат. 109992 Укр., МПК<sup>9</sup> F 28 D 1/04, F 23 L 15/04. Рекуператор / К.В. Агеев. — Опубл. 26.10.15, Бюл. № 20. (Власник Агеев К.В.).

**Агеев Костянтин Валерійович. Рекуперативні теплообмінники на основі струминно-вихрової технології в технологічних процесах та апаратах.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика і промислова теплоенергетика. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2015.

Запропоновано струминно-вихрову технологію підвищення ефективності утилізації тепла в металевих трубчастих рекуператорах з врахуванням інтенсифікації конвективного теплообміну на повітряній стороні, що призводить до додаткового корисного ефекту – збільшення температури підігрівання дуття до 300 °С із одночасним зниженням металоємкості і габаритів теплообмінників у 2...3 рази. Виконані експериментальні дослідження роботи струминно-вихрових рекуператорів на фізичній моделі. Результати експериментів показали, що вставка у вигляді перфорованої по спіралі повітряної труби з лопатями у формі гвинтової крильчатки належить до окремого класу вихрових систем – систем з активними гідрогазодинамічними режимами, на відміну від традиційних завихрювачів циклонних апаратів. Розроблена CFD-модель струминно-вихрового рекуператора і виконано числове моделювання параметрів його роботи на основі даних експериментальних досліджень – фізичного, імітаційного моделювання на фізичній моделі з погрішністю порівняною з точністю використовуваної в експериментах вимірювальної техніки. Розроблені рекомендації для практичного використання струминно-вихрових рекуператорів на принципах енергозберігаючих технологій. Встановлені техніко-економічні переваги запропонованої конструкції струминно-вихрових рекуператорів, що дозволяє досягти економії газоподібного палива в печах до 15-16 %.

**Ключові слова:** струминно-вихрова технологія, апарати з активними гідрогазодинамічними режимами, фізична модель, CFD-моделювання.

**Агеев Константин Валериевич. Рекуперативные теплообменники на основе струйно-вихровой технологии в технологических процессах и аппаратах.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2015.

В работе рассмотрены основные теоретические представления о вихревом движении применительно к решению технических задач. На основе теории вихрей рассмотрен вопрос о неустойчивости спиральных вихревых пространственных структур при дуплете либо триплете вихревых нитей. Проведена оценка теплотехнического оборудования, в частности, рекуператоров. Показано, что теплотехнические агрегаты — вихревые устройства, такие как

вихревые топки, камеры сгорания и др. обладают существенными преимуществами благодаря работе в активных гидрогазодинамических режимах, а эффективность их работы в основном зависит от их режимных и конструктивных параметров. Вихревой эффект, возникающий в этих устройствах, позволяет выполнять их компактными, с повышенным коэффициентом энергоэффективности, что соответствует задачам, поставленным в Энергетической стратегии Украины до 2030 г. Приведена конструкция струйно-вихревого компактного рекуператора, особенности работы которого хорошо согласуются с теорией концентрированных вихрей. Показано, что работа струйно-вихревого рекуператора не вполне тождественна циклонным вихревым теплообменникам по характеру протекающих в нем процессов. Предложена струйно-вихревая технология повышения эффективности утилизации тепла в металлических трубчатых рекуператорах с учетом интенсификации конвективного теплообмена на воздушной стороне, которая приводит к дополнительному полезному эффекту – увеличению температуры подогревания дутья до 300 °С и одновременным снижением металлоемкости и габаритов теплообменников в 2...3 раз. Выполнены экспериментальные исследования работы струйно-вихревых рекуператоров на физической модели. Результаты экспериментов показали, что вставка в виде перфорированной по спирали воздушной трубы с лопастями в форме винтовой крыльчатки относится к отдельному классу вихревых систем – систем с активными гидрогазодинамическими режимами в отличие от традиционных завихрителей циклонных аппаратов. Разработана CFD-модель струйно-вихревого рекуператора и выполнено числовое моделирование параметров его работы на основе данных экспериментальных исследований: физического, имитационного моделирования на физической модели с погрешностью сравнимой с точностью, применяемой в экспериментах измерительной техники. Разработаны рекомендации для практического использования струйно-вихревых рекуператоров на принципах энергосберегающих технологий. Установлены технико-экономические преимущества предложенной конструкции струйно-вихревых рекуператоров, позволяющей добиться экономии газообразного топлива в печах до 15–16 %.

**Ключевые слова:** струйно-вихревая технология, аппараты с активными гидрогазодинамическими режимами, физическая модель, CFD-моделирование.

**Agyeyev Kostyantyn. Recuperative Heat Exchangers based on Jet-Vortex Technology in Technological Processes and Systems.** – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.14.06 –thermophysics and technical and industrial combined heat and power. – Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2015.

Jet-vortex technology to increase efficiency of heat utilization in the tubular metallic recuperators with allowance for increased convective heat transfer on the air side is suggested, which leads to an additional beneficial effect — increase in temperature of heating air-blast to 300 °C and a simultaneous decrease in metal consumption and the dimensions of heat exchangers in 2...3 times. Experimental studies of work of jet-vortex heat exchangers on a physical model are performed. The experimental results showed that the insertion of a spirally perforated air-pipe with spiral impeller shape vanes qualifies as a separate class of vortex systems as the systems with hydrogasodynamic active modes, unlike conventional cyclone apparatus swirlers. CFD-model of jet-vortex recuperator is developed, and a numerical simulation of its operation parameters is performed on the basis of experimental study data: physical, imitating modeling on a physical model with an accuracy comparable to the precision used in experiments of measuring equipment. Recommendations for the practical use of jet-vortex recuperators on the principles of energy saving technologies were developed. Technical and economic benefits of the proposed construction of jet-vortex recuperators were established, which allows achieving savings of gaseous fuel in furnaces up to 15...16 %.

**Key words:** jet-vortex technology, hydrogasodynamic active modes systems, physical model, CFD-simulation.