

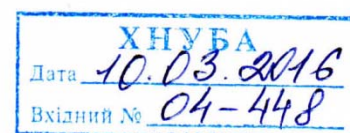
## Відгук

Офіційного опонента, кандидата технічних наук, доцента Алексахіна Олександра Олексійовича на дисертаційну роботу Галушак Ірини Володимирівни «Підвищення ефективності конвективних поверхонь нагріву котельних агрегатів в системах теплогазопостачання», що подана до спеціалізованої вченої ради Д 64.056.01 в Харківському національному університеті будівництва та архітектури на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.03 – вентиляція, освітлення та теплогазопостачання.

### **Актуальність теми дисертації.**

В сучасній промисловості і житлово-комунальному господарстві економія і раціональне використання первинних енергоресурсів є однією з головних науково-технічних проблем. Разом з необхідністю охорони довкілля це обумовлено високою вартістю первинних енергоресурсів та конструкційних матеріалів.

Одним з методів вирішення цієї глобальної науково-технічної проблеми енерго- і ресурсозбереження є удосконалення процесів і конструкцій систем теплообмінних апаратів для різних типів енергетичних установок, в яких в результаті передачі того чи іншого виду енергії від однієї фізичної субстанції до іншої фізичної субстанції остання генерує енергію того ж виду, що їй і передається. До такого типу енергетичних установок відносяться, наприклад, такі теплові енергетичні установки, як парові і водогрійні котли-утилізатори, що використовують теплові вторинні енергоресурси, парогенератори АЕС, паливні парові і водогрійні котельні агрегати. У зв'язку з цим дуже перспективним напрямком застосування вищезначеного методу з метою енерго- і ресурсозбереження є його використання як однієї із складових вирішення задачі підвищення теплоаеродинамічної ефективності конвективних поверхонь нагріву



котельних агрегатів систем теплогазопостачання, вкрай важливих для економіки України.

З огляду на це, дисертаційна робота Галушак І.В., яка безпосередньо спрямована на пошук раціонального типу конвективних поверхонь нагріву котлоагрегатів та умов їх застосування, що забезпечують максимальні економічні та екологічні характеристики, є актуальною і своєчасною.

Про актуальність даної дисертації свідчить також виконання її відповідно до Комплексної програми «Енергетична стратегія України до 2030р.», затвердженої Кабінетом Міністрів України від 01.03.2006р., розділ «Пріоритетні напрями та обсяги енергозбереження, потенціал розвитку нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії до 2030р.»; Законів України «Про теплопостачання» (2005р.), «Про енергозбереження» (2005р.), а також в рамках бюджетних науково-дослідних тем МОН України, які виконуються в ХНУБА: «Термодинамічна ефективність процесів перетворення теплоти відхідних газів в електроенергію в тепловикористовуючих агрегатах промислових підприємств» (№ д/р 0115U000844, 2015-2018рр.) та в НТУ «ХП»: «Створення і розвиток теорій, методів і моделей оптимального керування режимами роботи, розподілом навантажень та плануванням ремонтів складних теплоенергетичних систем з метою підвищення їх енергоефективності та надійності» (№ д/р 0112U000407, 2015-2017 рр).

**Загальна характеристика роботи.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел інформації, який включає 127 найменувань. Матеріали дисертаційної роботи викладено на 186 сторінках загального тексту.

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовано суть науково-технічної задачі, відповідність державним науковим програмам. Наведено наукову новизну і практичне значення результатів дисертаційної роботи. Визначено об'єкт і предмет дослідження, сформульовано тему і завдання дослідження.

**У першому розділі** розглянуто технічний стан котельного обладнання централізованих та місцевих джерел тепlopостачання. Відзначено, що значна частина котельних установок вичерпала проектний ресурс роботи і не відповідає вимогам сучасності з економічності.

Доведена необхідність і можливість удосконалення котельних агрегатів систем тепlopостачання шляхом значного зниження температури відхідних газів на основі використання інтенсифікованих ребрених конвективних поверхонь нагріву.

Виконано огляд та аналіз результатів існуючих теоретичних особливостей теплообміну в розвинених поверхнях нагріву і параметрів, що їх характеризують, а також результатів експериментальних досліджень теплообміну та аеродинамічного опору ребрених поверхонь нагріву котлоагрегатів. З результатів цього аналізу зроблено висновок про перспективність застосування поверхонь нагріву з просічним спірально-стрічковим ребренням.

Проведено всебічний аналіз існуючих результатів досліджень теплоаеродинамічної ефективності пучків труб з просічним спірально-стрічковим ребренням і запропонованих методів теплового і аеродинамічного їх розрахунків. Виявлено, що існуючі дослідження і методи розрахунків не враховують вплив на теплообмін та аеродинамічний опір геометричних характеристик просічної частини ребер. Доведена необхідність подальших досліджень і узагальнення їх результатів та удосконалення методів розрахунків.

Розглянуто можливість використання чисельних методів дослідження теплообміну в таких складних розвинених поверхнях нагріву, як пучки труб з просічним спіральним ребренням.

**Другий розділ** присвячено методам і результатам чисельних досліджень теплогідравлічних характеристик просічного ребрення. Для дослідження гідродинаміки та теплообміну в міжреберних плоско-паралельних каналах з суцільними і переривчастими ребрами розроблена

математична модель, сформульована диференційними рівняннями плоского пограничного шару. При розробці моделі велику увагу приділено визначенню коефіцієнтів турбулентного переносу кількості руху і тепла. Розв'язання рівнянь математичної моделі виконано з використанням відомої неявної стійкої чотирьоточкової схеми, що має властивості стабілізації високочастотних обурень і яка не потребує ітерацій. В чисельному дослідженні теплогідравлічні процеси оцінювались характером зміни поздовжньої осьової швидкості потоку газів, критерія Стантона та коефіцієнта гідравлічного опору. Одержані результати переконливо показали значну інтенсифікацію теплообміну в каналах з переривчастими стінками відносно каналів з суцільними стінками. Тим самим теоретично обґрунтована доцільність застосування просічного ребрення.

Майже пропорційно підвищується і коефіцієнт гідравлічного опору.

Перевірена достовірність отриманих результатів шляхом їх порівняння з наявними в літературі. Отримано задовільний збіг значень порівнюваних параметрів.

Для дослідження теплового стану і теплообміну труби з просічним спірально-стрічковим ребренням автором розроблені математична модель і метод чисельного дослідження стосовно розрахункового модуля, визначеного на основі попереднього аналізу. Розрахунковий модуль являє собою пелюсток і прилеглі до нього сектори суцільної частини ребра і труб. Модуль розбивається на ряд елементарних об'ємів, і для кожного об'єму на основі закону збереження енергії сформульована система алгебраїчних рівнянь, кожне з яких є аналогом рівняння енергії для відповідного елементарного об'єму.

Розроблено метод рішення отриманої системи алгебраїчних рівнянь на основі алгоритму методу прогонки та програму розрахунків. У результаті чисельного дослідження визначено вплив геометричних розмірів труби і ребрення, в тому числі просічної частини ребер, на середньповерхневий теплообмін в міжреберних каналах, тепловий потік, максимальну

температуру ребра та питомі теплові потоки на одиницю довжини труби, її об'єм і масу.

Отримані результати дозволяють визначити співвідношення геометричних розмірів оребрення для досягнення раціональних значень окремих параметрів теплової ефективності реальної поверхні нагріву на стадії проектування в залежності від її призначення, а також для врахування їх в узагальнених співвідношеннях для розрахунку тепловіддачі.

**У третьому розділі** наведені опис експериментальної установки, конструктивні розміри дослідних труб, методи експериментального дослідження теплообміну та аеродинамічного опору шахових і коридорних пучків труб з просічним спірально-стрічковим оребренням, методи обробки результатів, похибки визначення основних параметрів – критеріїв Рейнольдса, Нуссельта і Ейлера. Виміри всіх фізичних параметрів (температури, перепадів тиску, витрати повітря, електричних параметрів нагрівачів) виконані стандартними методами і приладами відповідно до існуючих правил. Середньоповерхневий теплообмін пучків труб визначався методом повного теплового моделювання. Наведено також метод визначення приведенного коефіцієнта тепловіддачі і коефіцієнта ефективності ребра. Розроблено метод експериментального дослідження теплообміну безпосередньо в міжреберних каналах на основі результатів виміру температури по висоті ребра і повітря в міжреберному каналі, а також визначення витрати повітря через межреберні та міжтрубні канали.

**У четвертому розділі** наведені результати і аналіз експериментального дослідження теплообміну в шахових і коридорних пучках труб з просічним спірально-стрічковим оребренням з максимальною висотою просічення. Встановлені залежності конвективної тепловіддачі глибинних рядів труб пучка від числа Рейнольдса, розташування труб у пучку та коефіцієнта оребрення в межах зміни цих параметрів в досліді. Залежність тепловіддачі від числа Рейнольдса для обох типів компоновки пучка степенева зі змінними коефіцієнтами в рівнянні подібності. Дослідні залежності цих

коефіцієнтів від параметрів розташування і коефіцієнту оребрення апроксимовані автором емпіричними рівняннями. Отримано залежності тепловіддачі від крокових характеристик шахових і коридорних пучків труб та коефіцієнту оребрення.

Шляхом зіставлення результатів експерименту з коефіцієнтами тепловіддачі пучків труб з суцільним спірально-стрічковим оребренням встановлено, що просічне оребрення збільшує тепловіддачу шахових пучків труб на 32...43% і на 17...33% – коридорних.

Зіставлення результатів експерименту з результатами, отриманими попередніми дослідниками, показало збільшення інтенсивності тепловіддачі при збільшенні висоти пелюстків оребрення. На цій підставі автором зроблено висновок про необхідність урахування висоти пелюстків в узагальнених співвідношеннях для розрахунку тепловіддачі.

Наведено результати дослідження тепловіддачі малорядних пучків, запропоновано емпіричні рівняння для розрахунку поправки на малорядність до узагальнених співвідношень.

З результатів експериментального дослідження теплообміну встановлено, що тепла ефективність просічного оребрення на 3...19% вища за ефективність суцільного спірально-стрічкового оребрення.

Результати експериментального дослідження теплообміну безпосередньо в міжреберних каналах задовільно співпадають з результатами відповідних чисельних досліджень, наведеними у другому розділі, а також з результатами експериментального дослідження середньоповерхневого теплообміну глибинних рядів, наведеними в цьому розділі, підтверджують достовірність результатів чисельного дослідження, що дозволило автору використати їх в запропонованих узагальнених рівняннях.

**У п'ятому розділі** розглянуто результати експериментального дослідження аеродинамічного опору шахових і коридорних пучків труб з просічним спірально-стрічковим оребренням з максимальною висотою пелюстків.

Визначено залежність дослідних значень коефіцієнтів рівняння подібності від геометрії оребрення і крокових характеристик пучків, які узагальнені автором емпіричними рівняннями, рекомендованими для інженерних розрахунків аеродинамічного опору. Наведені також дослідні залежності питомого аеродинамічного опору шахових і коридорних пучків від геометричних характеристик оребрених труб і пучків.

В розділі наведені також результати розрахунків теплоаеродинамічної ефективності поверхонь нагріву з суцільним і просічним спіральнострічковим оребренням котла-утилізатора П-83. Визначено значні переваги поверхонь з просічним оребренням. Для порівняння додатково розраховані маса, величина поверхні нагріву, вартість металу та аеродинамічний опір гладкотрубних поверхонь для передачі однакового теплового потоку. Підтверджена недоцільність використання гладкотрубних поверхонь в умовах малих температурних напорів.

**У висновках** наведені основні результати та висновки, які отримані в процесі виконання наукових досліджень дисертаційної роботи. Висновки відповідають основним положенням дисертації і достатньо обґрунтовані. Їх аналіз вказує на те, що мета дисертаційної роботи досягнута, а завдання дослідження виконані.

**Ступень обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.** В дисертаційній роботі наведено комплексний аналіз існуючої науково-технічної задачі, теоретичні і експериментальні шляхи її розв'язання. Теоретичні положення дисертації сформульовані на базі відомих фундаментальних основ теорії теплообміну і гідродинаміки, експериментальні – на основі використання найбільш точних методів теплового моделювання. Всі розділи дисертації підпорядковані єдиній меті дослідження та логічно пов'язані між собою. Отримані результати, висновки і рекомендації науково обґрунтовані.

**Достовірність** наукових положень, висновків і рекомендацій, що містяться в дисертації, підтверджується комплексним підходом до рішення

експериментальних задач і математичного моделювання, коректним застосуванням математичного апарату, адекватністю розрахункових залежностей та експериментальних даних, взаємоузгодженістю результатів, отриманих різними методами. Достовірність результатів чисельних досліджень з гідродинаміки і теплообміну підтверджуються також відомими результатами досліджень Кейса В.М., Себісі Т. і Бредшоу Л., Маллісена Р.С. і Лерке Р.І.

**Новизна** наукових положень, висновків і рекомендацій полягає в тому, що автором отримані такі наукові результати:

- вперше, в результаті чисельного дослідження, виконаного на основі розроблених автором математичної моделі і метода, отримано теплогідравлічні характеристики течії, що розвивається в міжреберних каналах з переривчастими ребрами. Встановлено суттєве перевищення інтенсивності теплообміну у вказаних каналах відносно тепловіддачі каналів з суцільними ребрами, що по суті являє собою наукове обґрунтування доцільності застосування просічного оребрення;

- розроблені нові математична модель і метод чисельного дослідження теплообміну труби з просічним спірально-стрічковим оребренням; за результатами дослідження встановлені залежності температури елементів оребрення і параметрів ефективності теплообміну від геометричних розмірів просічного оребрення, які дозволяють визначити субоптимальні сполучення цих розмірів для конкретних умов роботи теплообмінної поверхні;

- установлені з результатів експериментального дослідження закономірності теплообміну та аеродинамічного опору шахових і коридорних пучків труб з просічним спірально-стрічковим оребренням з максимальною висотою просічення, які раніше не досліджувались. Установлено, що просічення ребер на максимально допустиму висоту збільшує тепловіддачу шахових пучків на 33...43%, коридорних – на 17...33% при майже пропорційному зростанні аеродинамічного опору.



- удосконалені методики розрахунку тепловіддачі і аеродинамічного опору поверхонь нагріву з просічним спірально-стрічковим ребренням шляхом урахування окремо усіх геометричних розмірів просіченої частини ребер.

**Практична цінність роботи та рекомендації щодо використання результатів.** Результати досліджень мають практичну цінність. В умовах наявної неоднозначності оцінок теплоаеродинамічної ефективності поверхонь нагріву з просічним спіральним ребренням труб насамперед має значення аргументоване підтвердження їх ефективності і доцільності використання в котельних агрегатах. Широкому впровадженню вказаних поверхонь сприяють також удосконалені методики розрахунків тепловіддачі і аеродинамічного опору. Результати дослідження впроваджені НТП «Котлоенергопром» в проект нового котла-утилізатора для підприємств газопостачання, а також використовуються в навчальному процесі в Харківському національному університеті будівництва та архітектури і в Харківському національному технічному університеті «ХПТ». Їх подальше використання доцільно при розробці конструкцій котлоагрегатів відповідними науково-технічними організаціями, а також в викладацькій діяльності в галузі знань «Енергетика» в ВНЗ.

**Повнота викладення основних наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих роботах** підтверджується тим, що основні результати та положення дисертаційної роботи повністю викладені у вигляді наукових статей в 14 виданнях, в тому числі в 8-ми фахових виданнях України, 4-х іноземних фахових виданнях і 2-х тез доповідей. Вимоги МОН до кількості публікацій у спеціалізованих виданнях виконано. Основні положення роботи пройшли апробацію на 6-ти міжнародних та 2-х національних науково-технічних конференціях.

Автореферат досить повно та об'єктивно відображає зміст дисертаційної роботи.

**Зауваження до дисертаційної роботи.**

1. В першому розділі дисертації наведено досить детальний аналіз лише одного із двох існуючих критеріїв оцінки ефективності ребра і зовсім не згадується другий.

2. В чисельному дослідженні теплогідравлічних характеристик плоско-паралельних каналів з переривчастими стінками не вивчено характер впливу відстані між елементами переривчастих ребер в напрямку потоку на теплообмін. Така інформація була б доречною тим більше, що в першому розділі наведені протилежні оцінки цього впливу (стор. 24, 25), а розроблений в дисертаційній роботі метод чисельного моделювання дозволяє дослідити цей вплив.

3. Вплив на теплообмін і гідравлічний опір довжини суцільних елементів переривчастих ребер плоско-паралельних каналів досліджено тільки для двох значень довжини (4 і 12 мм), що недостатньо для кількісної оцінки зазначеного впливу.

4. В експериментальній установці дослідна аеродинамічна труба розміщена на стороні нагнітання вентилятора. Розміщення її на стороні всмоктування з лемнікатним входом, забезпечує більш рівномірні поля швидкостей і статистичних тисків в робочій її ділянці.

5. Матеріал, наведений на початку четвертого розділу (стор. 111-113), в тому числі рис. 4.1, доречно було б навести в першому розділі.

#### **Загальні висновки.**

Зроблені зауваження в цілому не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Галушак Ірини Володимирівни «Підвищення ефективності конвективних поверхонь нагріву котельних агрегатів в системах теплогазопостачання», зміст якої відповідає паспорту спеціальності 05.23.03 – вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Дисертаційна робота містить раніше не захищені наукові положення та нові науково-обґрунтовані результати. Вона є закінченим самостійним кваліфікаційним науковим дослідженням, яке спрямоване на вирішення актуальної науково-

прикладної задачі підвищення технічного рівня теплогенеруючого обладнання систем теплогазопостачання та охорони довкілля.

Виходячи з актуальності науково-практичної задачі, достатньо високого рівня виконаних наукових досліджень та результатів практичного впровадження, вважаю, що дисертаційна робота «Підвищення ефективності конвективних поверхонь нагріву котельних агрегатів в системах теплогазопостачання» має суттєве наукове і практичне значення, відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а також вимогам МОН України щодо кандидатських дисертацій, а її автор Галушак Ірина Володимирівна заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.03 – вентиляція, освітлення та теплогазопостачання.

Офіційний опонент, доцент кафедри теплофізики  
і молекулярної фізики

Харківського національного університету

імені В.Н.Каразіна,

кандидат технічних наук, доцент



Алексахін О.О.

