

## ВІДГУК

### офіційного опонента

на дисертаційну роботу Мейріса Антона Жановича  
«Теплообмін та теплогідравлічна ефективність  
пучків труб з поверхневими заглибленнями»,

що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

*Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової задачі – встановлення закономірностей теплообміну і гідродинаміки при поперечному обтіканні труб із поверхневими заглибленнями, що дозволило обґрунтувати діапазон раціональних геометричних і режимних параметрів теплообмінного устаткування трубчастого типу з покращеними теплогідравлічними властивостями.*

**Актуальність теми дисертації.** Теплообмінники різноманітного призначення широко застосовуються у всіх галузях народного господарства та побуті. Покращення їхніх характеристик є актуальною науковою та прикладною проблемою, воно безпосередньо пов'язано з ефективним використанням енергоресурсів. Для підвищення теплогідравлічної ефективності теплообмінного устаткування потрібні, насамперед, нові ідеї та підходи до створення теплообмінних поверхонь. Одним із сучасних підходів є застосування вихрового способу інтенсифікації теплообміну при обтіканні поверхонь із заглибленнями, при якому створюються умови, коли фактор інтенсифікації теплообміну перевищує фактор зростання гідравлічного опору. На даний час основний масив даних по цьому напрямку отримано стосовно внутрішніх течій, однак досить великий потенціал має застосування поверхневих заглиблень і для зовнішнього обтікання, зокрема, поперечного обтікання труб. Реалізація на практиці цього методу інтенсифікації дозволить суттєво (на 30...40%) знизити теплообмінну



поверхню трубчастих теплообмінників, що, враховуючи їхню значну матеріалоемність, може дати великий позитивний ефект.

Актуальність роботи визначається також тим, що для дослідження зовнішнього обтікання необхідно залучати методи комп'ютерного моделювання, оскільки вони дозволяють значно меншими затратами у порівнянні з експериментом вивчати фізичну структуру потоку, знаходити оптимальні режимні та геометричні параметри теплообмінного устаткування.

Дисертаційна робота відповідає тематичному напрямку «Енергетика та енергоефективність. Технології енергетичного машинобудування», визначеному постановою Кабінету Міністрів України №942 від 7 вересня 2011 р. Вона пов'язана з виконанням у 2012 – 2017 рр. низки державних тематик та господарчих договорів в Київському політехнічному інституті ім. І. Сікорського та Інституті технічної теплофізики НАН України.

### **Оцінка обґрунтованості і достовірності основних положень дисертації**

Обґрунтованість основних результатів та висновків дисертаційної роботи забезпечується комплексним підходом до проведення досліджень, який включає як фізичне, так і комп'ютерне моделювання. Узгодженість постановки і проведення фізичного та чисельного експериментів є одним із основних переваг даної дисертаційної роботи.

Автором застосовано сучасні методи проведення експерименту та узагальнення експериментальних даних. Дослідження базуються на обґрунтованих фізичних уявленнях аеродинаміки і теплообміну. Проведено порівняння результатів тестових експериментів для обтікання гладких труб з існуючими залежностями, яке виявило задовільне узгодження. При комп'ютерному моделюванні проведено верифікацію моделей турбулентності, зроблено реалістичні висновки щодо обґрунтованості їх використання для різних варіантів, які розглянуто в дисертації.

Достовірність отриманих результатів забезпечено детальним аналізом похибок вимірювань та порівнянням результатів математичного моделювання з

наявними літературними даними та даними експериментів, що отримані в рамках виконання дисертаційного дослідження.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

Автором отримано наступні основні нові наукові результати:

За допомогою комп'ютерного моделювання проаналізовано фізичну структуру потоку при поперечному обтіканні одиночної труби із заглибленнями, визначено основні закономірності гідродинаміки, локального та середнього теплообміну. Проведено порівняння з обтіканням гладкої труби, показано зміщення точки відриву вниз за потоком, і як наслідок – зменшення аеродинамічного опору. Отримано дані щодо залежності точки відриву потоку, аеродинамічного опору та коефіцієнту тепловіддачі від числа Рейнольдса.

На базі проведених експериментів отримано масив даних за коефіцієнтами теплообміну, гідравлічного опору та фактору аналогії Рейнольдса при поперечному обтіканні пучка труб із заглибленнями в раніше не дослідженому, але практично важливому діапазоні зміни числа Рейнольдса. Показано, що зростання теплообміну випереджає зростання аеродинамічного опору. В результаті статистичної обробки даних запропоновані нові співвідношення у вигляді рівнянь подібності.

### **Значення результатів дисертації для науки й практики**

Отримані автором результати і закономірності з фізичної структури, гідравлічного опору і теплообміну при обтіканні труб з поверхневими заглибленнями вносять вагомий внесок у термогазодинаміку поперечного обтікання одиночної труби та пучків труб.

Отримані розрахункові співвідношення можна застосовувати при проектуванні промислових теплообмінних апаратів різного призначення. Зокрема, вони використані при розробці методики розрахунку рекуператора для стаціонарної газотурбінної енергетичної установки потужністю 16 МВт по

замовленню Науково-виробничого комплексу газотурбобудування «Зоря-«Машпроект».

Отримані автором результати знайшли також своє використання в навчальному процесі при підготовці студентів Фізико-технічного інституту НТУУ КПІ за напрямом «Прикладна фізика».

### **Повнота викладу результатів дисертації в наукових фахових виданнях**

Основні положення дисертації опубліковано в 13 наукових працях, з них:

7 статей у наукових спеціалізованих виданнях України, перелік яких затверджено МОН України; з опублікованих статей 4 статті представлені у виданнях, які включено до міжнародних наукометричних баз даних Scopus, Copernicus та Ulrich's Periodicals Directory. Матеріали дисертаційної роботи доповідались та отримали схвалення на 6 наукових конференціях, відповідно вони опубліковані у тезах доповідей та збірниках. Обсяг друкованих робіт та їхня кількість відповідають вимогам МОН України щодо публікації основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Зміст автореферату є ідентичним основним положенням дисертації.

### **Зміст дисертації.**

Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний об'єм роботи складає 153 сторінки, у тому числі всього 64 ілюстрації, 3 таблиці, список літератури, що включає 67 найменувань, 3 додатки на 14 сторінках. Об'єм основного тексту дисертації – 108 сторінок.

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі досліджень, викладено наукову новизна та практичну значимість отриманих результатів, наведено дані про особистий внесок, публікації та апробацію наукових розробок.

**У першому розділі** проведено аналіз сучасного стану проблеми, зроблено огляд літератури по темі дослідження. Розглянуто фізичні механізми вихрової

інтенсифікації теплообміну при обтіканні поверхонь із заглибленнями, наведено дані щодо класифікації режимів, гідравлічного опору та теплообміну, проаналізовано основні закономірності. Основну увагу приділено поперечному обтіканню одиночної труби та пакетів труб із заглибленнями. Проаналізовано результати як експериментів, так і комп'ютерного моделювання. Зроблено висновки про необхідність подальших досліджень, сформульовано задачі дисертаційної роботи.

**Другий розділ** дисертації присвячено чисельному моделюванню поперечного обтікання одиночної труби із заглибленнями за допомогою комерційного пакету ANSYS CFX. Значну увагу у цьому розділі приділено пошуку адекватних моделей турбулентності, оскільки наявність тривимірних заглиблень значно ускладнює картину обтікання циліндру. В дослідженнях було розглянуто чотири моделі турбулентності, і в результаті був зроблений вибір на користь моделі SST. Порівняння тестових розрахунків обтікання гладкого циліндру з наявними даними різних авторів показали цілком задовільний збіг.

Розрахунки обтікання труби із заглибленнями показали суттєву розбіжність полів швидкості при обтіканні гладкого циліндру і циліндру із заглибленнями, особливо у кормовій зоні. Виявлено зміщення точки відриву вниз за потоком. Отримані залежності коефіцієнту лобового опору, локальних та середнього коефіцієнтів тепловіддачі від числа Рейнольдса. Значення фактору аналогії Рейнольдса склало величину 1,2...1,6, що вказує на сприятливу теплогідравлічну характеристику обтікання циліндру із заглибленнями.

**У третьому розділі** дисертації наведено результати комплексного експериментально-розрахункового дослідження обтікання п'ятирядного пучка труб із поверхневими заглибленнями. Експериментальні дослідження дозволили отримати дані по коефіцієнту гідравлічного опору (числу Ейлера) по пучку в цілому, та коефіцієнтам тепловіддачі, по окремих рядах та по пучку в цілому. Проаналізовано закономірності змінення коефіцієнтів тепловіддачі по рядах, отримані залежності для розрахунку середніх чисел Ейлера та Нуссельта від числа Рейнольдса.

Слід відзначити, що для пучка труб отримано розбіжність (до 50%) даних експериментів та комп'ютерного моделювання, що вказує на неадекватність вибраної моделі турбулентності для даного конкретного випадку. В цьому напрямі необхідні подальші дослідження. Однак слід відзначити, що комп'ютерне моделювання дозволило отримати фізичну картину потоку, що представляє інтерес для розуміння вихрових процесів при обтіканні труб із заглибленнями.

Важливою частиною третього розділу дисертації є аналіз зменшення теплообмінної промислового рекуператора при заміні гладких труб на труби із заглибленнями. Це зменшення може досягати 20÷30%, що є досить вагомим.

**У Висновках** наведено основні результати, одержані в дисертаційній роботі, які суттєво розширюють базу даних з теплообміну і гідродинаміки при поперечному обтіканні циліндрів із штучними вихорогенераторами, та вирішують важливу науково-прикладну задачу створення теплообмінного устаткування з покращеними теплогідравлічними властивостями.

В цілому дисертаційна робота справляє позитивне враження своєю завершеністю, структурою та логічною послідовністю викладення матеріалу.

### **Зауваження до дисертаційної роботи**

1. На мій погляд проведено недостатній аналіз моделей турбулентності. Автор обмежився порівнянням моделей тільки в рамках класу RANS (осереднені за часом рівняння Нав'є-Стокса). Тому вважаю не зовсім обґрунтованим вибір моделі SST для даної задачі.
2. При описі математичної моделі, що використовувалась в чисельних дослідженнях, слід було б навести рівняння замикання моделі турбулентності SST з усіма модельними константами або вказати посилання.
3. У зв'язку з тим, що основним механізмом теплопереносу в даній постановці задачі є формування, розвиток та зрив вихорів, тому вважаю недостатньо проведено аналіз та візуалізацію тривимірної вихрової структури.
4. На рис.3.19 та 3.20 слід було б зазначити, що зображено модуль швидкості або його компонента. Крім того, на мій погляд поле модуля швидкості в

даному перерізі не є інформативним. Краще було б представити поле поперечної компоненти завихореності.

5. На рис.3.11 відсутні точки, які є в описі «Точки – пучок труб із заглибленнями»

Висловлені зауваження істотно не впливають на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи А.Ж. Мейріса і не зменшують цінності отриманих в ній результатів. Дисертаційна робота є завершеною працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати в області теплообміну та гідродинаміки при поперечному обтіканні труб. Робота виконана на високому науковому рівні, містить нові значимі наукові положення, відповідає вимогам ДАК МОН України щодо дисертацій, поданих на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (п.п. 11, 12, 13 "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника"), а її автор Мейріс Антон Жанович заслуговує присудження вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 — Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент

Старший науковий співробітник

Інституту гідромеханіки НАН України,  
кандидат фізико-математичних наук

03.05.2018

Димитрієва Н.Ф.

Підпис Н.Ф.Димитрієвої засвідчую  
Вчений секретар ІГМ НАН України



Городецька Н.С.