

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

д.т.н., с.н.с. Горобця Валерія Григоровича
на дисертаційну роботу Мейріса Антона Жановича
«Теплообмін та теплогідравлічна ефективність пучків труб з
поверхневими заглибленнями», представлену на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 — технічна
теплофізика та промислова теплоенергетика.

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Підвищення ефективності теплообмінного устаткування є одним з найбільш важливих напрямів заощадження енергетичних та матеріальних ресурсів. На даний час значні зусилля науковців та проєктантів спрямовуються на пошук нових видів інтенсифікації теплообміну та підвищення теплогідравлічної ефективності теплообмінних поверхонь. Одним з перспективних методів вирішення цієї задачі є застосування поверхневих заглиблень, яке дозволяє досягати випереджаючого зростання теплообміну у порівнянні із зростанням гідравлічного опору. В результаті з'являється можливість значного зменшення теплообмінної поверхні та підвищення компактності теплообмінників.

Серед великої кількості існуючих видів теплообмінників значне місце займають теплообмінники трубчастого типу. Основні галузі їх використання – це хімічна технологія, металургія та енергетика (для утилізації та рекуперація теплоти викидних газів енергоустановок). Теплообмінники в цих галузях мають значні габарити та матеріаломісткість, тому при їх проектуванні та створенні основною задачею є зменшення теплообмінної поверхні та підвищення компактності. Нанесення заглиблень на зовнішню поверхню труби при її поперечному обтіканні дозволяє, окрім інтенсифікації теплообміну, знизити лобовий опір за рахунок зміщення відриву у кормову зону. Це призводить до покращення теплогідравлічної ефективності теплообмінника, і, зрештою, до зменшення його маси та габаритів при заданому тепловому навантаженні. Зазначені властивості труб з поверхневими заглибленнями дозволяють сподіватися на широке застосування цієї технології в практиці створення перспективного теплообмінного устаткування.

Пріоритетним напрямком в проектуванні сучасних теплообмінних апаратів є також моделювання їх робочих процесів. Застосування пакетів прикладних програм дозволяє досліджувати фізичну структуру потоку та робити висновки щодо подальшого удосконалення геометричних та режимних

параметрів теплообмінників, уникати багатьох проектувальних помилок, скорочувати строки і вартість розробок. Комплексний підхід до дослідження і аналізу аеродинамічних та теплообмінних процесів при поперечному обтіканні одиночної труби та пакету труб із заглибленнями дозволяє зробити необхідні висновки, які можуть слугувати теоретичною основою для проектування теплообмінників різноманітного призначення.

Аналіз останніх досягнень в області розробки нового теплообмінного устаткування показує, що тема дисертації, яка присвячена дослідженню перспективного метода інтенсифікації теплообміну за рахунок застосування поверхневих заглиблень на зовнішній поверхні труб, є актуальною як з наукової, так і прикладної точок зору.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота відповідає тематичному напрямку «Енергетика та енергоефективність Технології енергетичного машинобудування» (Постанова Кабінету Міністрів України №942 від 7.09.2011) Вона виконувалась за державними тематиками: № 2610-ф «Теплові і газодинамічні процеси в складних вихрових і закручених потоках» (КПІ ім. Ігоря Сікорського, 0113U002467»), № 1.7.1.853 «Дослідження поверхнево-вихрових систем для інтенсифікації теплообміну та підвищення ефективності охолодження поверхонь в перспективних ГТД» (ІТТФ НАНУ, 0112U002042), та №1.7.1.АХ.1 «Нові термодинамічні цикли та схеми завісного охолодження високотемпературних енергетичних установок» (договори між Відділенням цільової підготовки КПІ ім. Ігоря Сікорського, НАНУ та Президією НАНУ, 0115U000268), та в рамках роботи за Договором № 309/2048 від 01.05.2011 «Теплофізичне обґрунтування використання заглибин і виступів на трубчатих поверхнях» (ІТТФ НАНУ та Державне підприємство «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект»).

Структура та обсяг дисертації

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою. Роботу Мейріса А. Ж. виконано в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України. Дисертаційна робота викладена на 153 сторінках, складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Основний текст роботи викладений на 108 сторінках, має 3 таблиці, 64 рисунки та 3 додатки. Список використаних бібліографічних джерел містить 67 найменувань.

Додатки містять методику розрахунку рекуперативного теплообмінного апарату та акти впровадження основних результатів досліджень дисертаційної роботи.

Оформлення дисертації

Дисертаційна робота оформлена відповідно до стандарту ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки й техніки. Структура і правила оформлення». Матеріал дисертації викладено в послідовності, що відповідає поставленим в роботі завданням, текст дисертаційної роботи написано у науковому стилі. Обсяг і структура роботи відповідають вимогам, які встановлено АК МОН України. Автореферат дисертації повністю відображає основні положення роботи.

Зміст дисертації, об'єкт і предмет дослідження відповідають паспорту спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика як за формулою спеціальності, так і за напрямками досліджень.

Основний зміст роботи.

У вступі наведено обґрунтування необхідності проведення досліджень за темою дисертації, формулювання наукової проблеми та розкриття її сутності, подання наукових і практичних результатів роботи, даних по апробації роботи.

- *У першому розділі* проведено огляд публікацій по теплообміну та гідродинаміці при обтіканні поверхонь із заглибленнями – у каналах та при поперечному обтіканні труб. Окремо наведено дані щодо результатів комп'ютерного моделювання при обтіканні труб із заглибленнями. В цьому розділі також сформульовано задачі дослідження.

- *У другому розділі* дисертації наведено результати комп'ютерного моделювання гідродинаміки та теплообміну при поперечному обтіканні одиночної труби із поверхневими заглибленнями. Проведено верифікацію моделей турбулентності із використанням загальновідомих даних. Діапазон швидкостей набігаючого потоку відповідав умовам експериментів з трубним пучком. Отримані дані зі структури потоку, лобового опору та коефіцієнту теплообміну. Було зроблено важливий висновок, що основною причиною локального зростання коефіцієнта тепловіддачі є турбулізація потоку за заглибленнями. Отримані дані показали суттєве покращенні теплогідравлічної ефективності у порівнянні з гладкою трубою.

- *Третій розділ* дисертації містить результати експериментального дослідження та комп'ютерного моделювання при обтіканні п'ятирядного пучка труб із заглибленнями. Наведено опис експериментальної установки, методики проведення досліджень, зроблено аналіз похибок досліджень. Наведено дані щодо коефіцієнтів гідравлічного опору та тепловіддачі, як для окремих рядів, так і середніх по пучку труб. Отримано рівняння подібності для чисел Ейлера та Нуссельта. Результати комп'ютерного моделювання обтікання гладкотрубного пучка та пучка труб зі сферичними заглибленнями дозволили отримати фізичну картину потоку, коефіцієнти гідравлічного опору та тепловіддачі.

Висновки дисертаційної роботи містять наукові та прикладні результати проведених досліджень теплообміну та теплогідравлічної ефективності при обтіканні одиночної труби та пучка труб із заглибленнями, у них сформульовано основні положення щодо теоретичної і практичної цінності отриманих результатів.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.

Об'єктом досліджень є процеси теплообміну та гідродинаміки при поперечному обтіканні одиночної труби та пучка труб із поверхневими заглибленнями. В роботі використано комплексний підхід, який включає експериментальні дослідження та комп'ютерне моделювання з використанням комерційного пакету ANSYS CFX.

Сформульовані наукові положення дисертації, висновки і рекомендації базуються на сучасних знаннях властивостей аеродинамічних і теплообмінних процесів, отримані результати не суперечать відомим теоретичним твердженням. Достовірність забезпечена тестовими випробуваннями експериментального стенду і системи вимірювань, використанням апробованих методик проведення експериментів і методів узагальнення експериментальних даних, аналізом похибки вимірювань. Достовірність комп'ютерного моделювання забезпечена порівнянням результатів комп'ютерного моделювання та отриманих в роботі експериментальних даних, верифікацією моделей турбулентності.

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи обґрунтовані широким спектром проведених розрахункових досліджень, даними виконаних експериментів, узагальненням і систематизацією отриманих наукових результатів.

Наукова новизна отриманих результатів.

В дисертації отримані наступні нові наукові результати:

– вперше в широкому діапазоні зміни числа Рейнольдса – від 3000 до 25000, характерному для застосування у теплообмінному устаткуванні, виконано експериментальне та теоретичне дослідження теплообміну та гідродинаміки при поперечному обтіканні одиночної труби та пучка труб із заглибленнями, отримані узагальнюючі співвідношення по теплообміну та числу Ейлера;

– вперше на основі комп'ютерного моделювання досліджено структуру потоку у заглибленнях на поверхні одиночної труби із заглибленнями при поперечному обтіканні: виявлено суттєве затягування відриву потоку для обтікання одиночної труби із заглибленнями; показано, що інтенсифікація теплообміну випереджає зростання втрат тиску;

– вперше в широкому діапазоні змінення числа Рейнольдса – від 3000 до 25000, отримано дані щодо факторів інтенсифікації теплообміну та підвищення гідравлічного опору пучка труб.

Практичне значення одержаних результатів

Результати, отримані в дисертації, використані:

– в учбовому процесі Фізико-технічного інституту КПІ ім. Ігоря Сікорського за напрямом «Прикладна фізика»;

– при розробці методики розрахунку рекуперативного теплообмінного апарату для стаціонарної енергетичної газотурбінної установки потужністю 16 МВт по замовленню ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект».

Отримані результати можуть використовуватись при розробці трубчастого теплообмінного устаткування та інших пристроїв. При комп'ютерному моделюванні зовнішнього поперечного обтікання одиночної труби може бути застосована SST модель турбулентності, адекватність якої перевірено порівнянням з власними експериментальними даними.

Повнота викладення наукових положень, висновків та рекомендацій в опублікованих працях

Основні положення дисертації опубліковані 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; опубліковано 6 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Обсяг друкованих робіт та їх кількість відповідають вимогам МОН України щодо публікації основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертаційної роботи

Зміст автореферату є ідентичним до змісту дисертації і достатньо повно відображає основні положення дослідження.

Автореферат розкриває основні положення дисертації, у достатній мірі відтворює структуру і обсяг роботи. Дисертація та автореферат оформлені у відповідності до вимог оформлення кандидатських дисертацій.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи та автореферату

При загальній позитивній оцінці одержаних в роботі результатів і зроблених дисертантом висновків вважаю за необхідне зробити наступні зауваження.

1. В розділі 3 наведені критеріальні залежності числа Нуссельта і Ейлера від числа Рейнольдса для пучків труб із заглибленнями (формули (3.17)-(3.24) на стор. 109-112). Отримані залежності справедливі лише для труб одного діаметра ($d=22$ мм) та однієї геометрії розташування труб у пучку (для кроків $s_1/d=1,7$; $s_2/d=1,2$), що суттєво обмежує область застосування цих залежностей при розробці теплообмінних апаратів та пристроїв для пучків, які мають інший діаметр труб та іншу геометрію їх розташування.

2. При порівнянні розрахункових і експериментальних даних в розділі 3 отримана розбіжність, яка досягає 50% (рис. 3.22 стор.121). Вказана похибка, по всій ймовірності, викликана або недосконалістю моделі турбулентності, або недостатньо малим кроком сітки, яка використана при розрахунках. Тому при чисельному моделюванні досліджуваних об'єктів необхідно було вдосконалити представлену математичну модель.

3. Незрозуміло, як отримана залежність відношення маси рекуператора із заглибленнями до маси гладкотрубного регенератора для пучків із заданими кроками для різних діаметрів труб (рис. 3.24 стор. 126), адже в експериментальних дослідженнях використовувався пучок лише із одним діаметром труб $d=22$ мм.

4. В тексті дисертації є ряд похибок або неточностей. Наприклад, на рис. 2.11 (стор. 77) невірно вказано позначення кривих, на стор. 96 замість «загальна товщина каналу» потрібно використовувати «загальна довжина каналу», тощо.

5. В дисертації присутні граматичні помилки або використовуються «русизми» - на стор. 32 замість терміну «газові пухирі» доцільно використовувати «газові бульбашки», на стор. 107 замість «поперечний шаг» потрібно використовувати «поперечний крок», по тексті дисертації використовується термін «пограничний» і «примежовий» шар, «перетин» і «переріз» та наявні інші неточності.

Висновок.

В цілому, зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Мейріса А.Ж. Дисертація є завершеною науковою роботою, в якій отримані нові наукові результати в області гідродинаміки та теплообміну при поперечному обтіканні пучків труб із заглибленнями. За обсягом представленого матеріалу, глибиною пророблення поставлених задач і методичним рівнем їх вирішення, за науковою і практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота відповідає вимогам пп. 9, 11, 12, 13 «Положення про порядок присудження наукових ступенів і присвоєння вчених звань», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567, а її автор Мейріс Антон Жанович заслуговує присудження вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 — Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Завідувач кафедри теплоенергетики
Національного університету біоресурсів
і природокористування України
д.т.н., с.н.с.



В. Г. Горобець

