

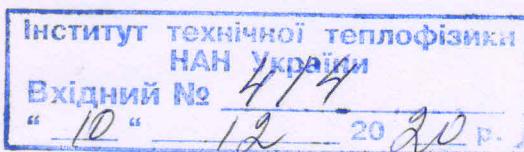
ВІДГУК

офіційного опонента на кваліфікаційну наукову працю
Ковецької Юліанни Юріївні
«Теплообмін, гідродинаміка та нестійкість в пористих середовищах та
мікроканальних пристроях»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 144 – Теплоенергетика

В дисертаційній роботі пані Ковецької Ю. Ю. розглядається наукова задача, яка пов'язана з дослідженням процесів гідродинаміки і тепломасообміну в мікроканалах при використанні аналітичних та чисельних методів моделювання. Мета дослідження пов'язана з необхідністю отримання залежностей для розрахунку характеристик мініатюрних пристройів. Мініатюрні розміри каналів значно ускладнюють, або взагалі унеможливлюють фізичні дослідження. Тому моделювання є чи не єдиним можливим методом їх вивчення. Вирішенню цих проблем присвячена дисертаційна робота пані Ковецької Ю. Ю.

Актуальність теми

В останні роки одним з найбільш динамічно розвинутих науково-технічних напрямків є створення побутових та промислових мікропристроїв. Дослідження теплообміну і гідродинаміки потоку в мікроканалах пористого середовища проводяться для забезпечення надійності теплообмінного обладнання в таких галузях як теплоенергетика, мікроелектроніка, біологія, біомедицина. У зв'язку з цим необхідно виконувати дослідження фізики процесів в мікроканалах та пористих середовищах. Відомо, що зі зменшенням лінійних масштабів основні закони механіки рідині вже не можуть застосовуватись, оскільки на характер процесів переносу впливають ефекти розрідження через зниження щільності. Експериментальні дослідження процесів переносу в мікроканалах пов'язані зі значними труднощами, тому тема дисертаційної роботи, яка присвячена аналітичним та чисельним методам



моделювання тепломасообмінних процесів та гідродинаміки в мікросистемах є актуальною як в науковому, так і в практичному плані.

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів

Основні результати, положення і висновки дисертації базуються на результатах чисельного дослідження. Дослідження проведено автором ґрунтуючись на методах математичного аналізу та стохастичного методу моделювання. Достовірність отриманих результатів та висновків підтверджується коректністю постановки задач дослідження, використанням сучасних розрахункових методів та задовільним узгодженням результатів, що одержані здобувачем, з результатами наведеними в літературі. Тому основні положення дисертаційної роботи слід визнати достовірними і обґрунтованими. Наукові результати узгоджуються із відомими теоретичними уявленнями про процеси перено капілярно-пористих структурах, доповнюючи їх, що свідчить про теоретичну цінність роботи. Обґрунтованість наукових положень та їх використання підтверджується апробацією у виробничих умовах.

Наукова новизна та значення результатів дослідження

Основні наукові положення, висновки і рекомендації, отримані автором і представлені в дисертації, безпосередньо пов'язані з метою дослідження і полягають в наступному:

- отримано результати впливу змішаної та примусової конвекції з різними граничними умовами проковзування в плоских та круглих пористих мікроканалах;
- вдосконалено метод граток Больцмана для проведення досліджень теплообміну та гідродинаміки в плоских та круглих пористих мікроканалах з різними граничними умовами проковзування;
- розвинуто методи дослідження нестійкості ламінарної течії із проковзуванням в пористому криволінійному каналі між двома нерухомими циліндрами;

- досліджено вплив пористості та проковзування на стійкість ламінарної течії в плоскому каналі.

Практичне значення отриманих результатів

Вдосконалені в дисертаційній роботі методи можуть використовуватися для визначення характеристик теплообміну і гідродинаміки рідин з різними параметрами течії та різною геометрією каналів. Використовуючи результати розрахунків, можна визначити параметри, які забезпечать необхідну інтенсивність теплообміну в обладнанні з малими геометричними розмірами. Результати досліджень впроваджені на підприємствах ТОВ «Монолітбуд–2001» та ДП СКТБ.

Структура дисертації та зміст розділів

Дисертаційна робота викладена на 140 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, який містить 128 найменувань. Обсяг основного тексту дисертації складає 123 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 4 таблицями, 34 рисунками.

У вступі наведено обґрунтування вибору теми дисертаційної роботи, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, темами і планами, сформульовано мету і завдання роботи, обґрунтовано вибір методів досліджень. Визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Вказано інформацію про апробацію результатів, особистий внесок здобувача, публікації автора і структуру роботи.

У першому розділі наведено огляд літературних джерел щодо галузей використання пористих мікроканальних пристройів та перспектив їх застосування. Розглянуто ряд робот, присвячених теоретичним та експериментальним дослідженням інтенсифікації теплообміну в приладах терморегулювання з метою їх теплофізичної активності та надійності. Аналіз досліджень показав, що беручи до уваги особливості течії в мікроканальних

системах (невиконання умови прилипання на стінці), використання граничних умов другого порядку дозволяє при моделюванні процесів значно розширити кількість видів робочих рідин, для яких число Кнудсена має значення більше, характерних значень для суцільних середовищ.

У другому розділі розглянуто модифіковану математичну модель теплообміну та гідродинаміки в плоских та круглих мікроканалах та математичні методи їх аналізу. Система рівнянь, що входить в модель, враховує вплив пористості середовища і умови проковзування першого та другого порядку на теплові та гідродинамічні характеристики потоку.

Представлено алгоритм застосування методу грат Больцмана, який базується на дискретизації рівнянь Больцмана у наближенні BGK. При імітації потоку в плоскому каналі використовували двомірну гратку $D2Q9$ з дев'ятьма напрямками швидкості, а для круглого каналу – $D3Q15$ з п'ятнадцятьма напрямками швидкості. Також враховувались граничні умови першого та другого порядку та вплив пористості.

На основі ренормалізаційно групового методу виконано моделювання з застосуванням k-ε RNG моделі турбулентності. В результаті отримано модифікований вираз для ренормалізованих коефіцієнтів переносу.

Для дослідження нестійкості ламінарної течії розглянуто метод малих збурень, який дозволяє аналізувати різноманітні види гідродинамічної та теплової нестійкості та визначати критичні параметри нестійкості.

Третій розділ присвячено аналізу гідродинамічної нестійкості ламінарної течії в пористих каналах різної конфігурації. Розглянуто аналіз гідродинамічної нестійкості розрідженої потоку із проковзуванням в плоскому пористому каналі. Дослідження проведено на основі виведеного рівняння руху для двовимірних збурень. Розрахунки показали, що збільшення ефекту проковзування і зменшення пористості призводить до стабілізації потоку та зменшенню критичного хвильового числа, тобто критична довжина хвилі обурення збільшується.

Використовуючи метод малих збурень, виконано аналіз нестійкості ламінарної течії на основі тривимірних збурень в плоскому пористому каналі.

Для опису пористого середовища застосовано модель Дарсі-Брікмана-Форхаймера. Розрахунки показали збільшення критичних значень числа Рейнольдса з ростом параметрів M та Λ , що характеризують пористість.

За допомогою підходу RNG отримано вираз для визначення кінематичного коефіцієнта в'язкості. Отриманий вираз використано для визначення критерію нелінійної нестійкості. Результати аналізу нестабільноті дозволяють оптимізувати вибір геометричних характеристик пористого середовища для реалізації потоків у технологічних процесах. Використовуючи зв'язок між проникністю та пористістю отримано критичне число Дарсі та критичне значення пористості.

Представлено результати дослідження відцентрової нестійкості течії рідини в зазорі криволінійного мікроканалу, який утворюється двома концентричними циліндричними поверхнями. Тенденція збільшення значення критичного числа De_{cr} зі збільшенням параметра проковзування спостерігається при всіх значеннях пористості. При течії чистої рідини залежність критичного числа Діна має мінімум, а в умовах без проковзування цей мінімум не спостерігається. Наявність мінімумів обумовлено тим, що зі зменшенням розміру каналу при наявності умов проковзування розвиток гідродинамічної нестійкості стає більш складним. Отримані результати підтверджують посилення впливу проникності зі збільшенням ширини зазору каналу, а при її зменшенні відбувається стабілізація потоку.

У четвертому розділі розглянуто результати дослідження процесів переносу при конвекції в пористих мікроканалах при граничних умовах проковзування.

Представлено результати дослідження впливу змішаної конвекції в мікроканалах. Математична модель включає в себе модифіковану систему рівнянь Навье-Стокса, енергії та нерозривності з граничними умовами проковзування першого порядку.

Аналіз результатів показав, що збільшення числа Кнудсена викликає стрибки температури на стінці. Зменшення пористості призводить до вирівнювання профілів температури, а стрибки температури на стінці

зменшуються. Стрибок температури зменшується зі зростанням числа Релея та числа Прандтля. Збільшення числа Кнудсена призводить до збільшення швидкості проковзування. Зі зменшенням пористості цей ефект також нівелюється та знижується швидкість у центрі каналу. Також зі збільшенням значення числа Релея градієнт швидкості біля стінки зменшується, тобто, ефекти мікротечій більш яскраво виражені переважно при впливі вимушеної конвекції, при цьому, профіль швидкості стає М-подібним і мінімум швидкості виникає на осі каналу, тобто вплив вільної конвекції стає переважаючими. Це явище відбувається в плоскому каналі при більш високих значеннях числа Релея.

Аналіз результатів досліджень впливу фізичних параметрів на процес теплообміну свідчать про те, що збільшення ефекту проковзування знижує інтенсивність теплообміну для двох типів геометрії каналу. Зі зростанням числа Релея виникає інверсія впливу пористості на тепловіддачу.

В цьому розділі авторкою представлено порівняння результатів чисельного розрахунку на основі методу LBM та аналітичного аналізу. Авторка стверджує, що порівняння результатів дало добре узгодження (відхилення не перевищує 1%), тобто метод LBM може використовуватися при моделюванні фізичних процесів в складних геометричних формах, де не можливо застосування аналітичних методів.

В роботі авторкою представлено результати дослідження впливу примусової конвекції в пористих мікроканалах різної геометрії з урахуванням граничних умов проковзування першого та другого порядку на процеси гідродинаміки і теплообміну. Отримано аналітичні рішення для профілів швидкостей, температур та коефіцієнта тепловіддачі з різними видами граничних умов проковзування. Розрахунки проводилися для різних значень коефіцієнта A_2 . Значення $A_2 = 0$ означає випадок граничних умов першого порядку. Показано, що при будь якій пористості зміна коефіцієнта A_2 від негативних до позитивних значень викликають зменшення різниці температур на стінці і в центрі каналу. При від'ємному значенні коефіцієнта A_2 стрибок швидкості на стінці більш значний. Зміна A_2 від негативного до позитивного

призводить до зменшення швидкості проковзування на стінці та швидкості в центральній частині каналу.

Представлені результати дослідження впливу примусової конвекції на інтенсивність теплообміну підтверджують попередні розрахунки. При малих числах Прандтля переважає ефект проковзування і вплив параметрів другого порядку не спостерігався. При високих числах Прандтля стрібок температури на стінці практично вироджується, що призводить до збільшення інтенсивності теплообміну зі збільшенням числа Кнудсена.

Висвітлення результатів дисертації в опублікованих працях

Основні наукові результати дисертації викладено у 9 наукових публікаціях, серед них – 3 статті, які входять до Міжнародної наукової метричної бази **Scopus, ISI Web of Science**; 11 наукових публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації, серед них – 4 статті, які входять до Міжнародної наукової метричної бази **Scopus, ISI Web of Science**.

Апробація результатів

Основні положення і матеріали дисертаційної роботи були представлені доповідями на міжнародних науково – практичних конференціях з публікаціями тез доповідей: X Міжнародній конференції «Проблеми промислової теплотехніки», м. Київ, 23-26 травня 2017р; VI Міжнародній науково – практичній конференції «Комп’ютерна гідромеханіка», м. Київ, 26-27 вересня 2018р; XI Міжнародній конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики», 21-22 травня 2019р.

Оформлення дисертації, стіль викладу та мова дисертаційної роботи

Робота написана українською мовою на високому науково – професійному рівні. Матеріал викладено в послідовності, що відповідає поставленим в роботі завданням. Стиль висловлювання та подача матеріалу досліджень є логічними, послідовними і зв’язаними єдиною цільовою спрямованістю. Дисертаційна робота оформлена відповідно вимогам «Порядку присудження наукових

ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України №567 від 24.07.2013р. (п.п.9,10,12,13) та ДСТУ 3008 – 95 «Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення».

Зauważення і питання по кваліфікаційній роботі

1. У загальному вигляді рівняння енергії (с. 35) повинно мати складову, яка враховує наявність та величину внутрішніх джерел (стоків) теплоти q_v . Якщо внутрішні джерела (стоки) теплоти відсутні, тоді в умовах однозначності необхідно це положення сформулювати.
2. Необхідно пояснити, яким чином зі зменшенням лінійних масштабів та збільшенням площин поверхні по відношенню до маси мікропристрою зростають величини перенесення маси, імпульсу та енергії через поверхню (с. 37)?
3. Необхідно обґрунтувати використання в якості характерного розміру В числах подібності проникність K . Яким чином вона визначається(с. 46) ?
4. Твердження, що при певних значеннях потоку та властивостей пористого середовища (формула 3.1.4. с.73) турбулентна в'язкість вироджується потребує аргументованого пояснення.
5. Одним з найбільш вагомих здобутків дисертанта є те що при порівнянні залежностей 3.2.4. і 3.2.5. (с. 78) тривимірний потік в порівнянні з двовимірним менш стійкий. Крім того, це суперечить висновкам теореми Сквайра що потребує глибокого аналізу і підтвердження.
6. На рис. 4.32.5 та 4.4.5 (с. 116, 124) представлені залежності нормованого числа Нуссельта Nu від числа Кнудсена Kn та числа Прандтля Pr для плоского і циліндричного каналів які ідентичні між собою. Це твердження потребує пояснення.

Загальний висновок.

Кваліфікаційна наукова робота Ковецької Ю. Ю. є завершеною науковою працею. Означена в роботі мета досягнута, поставлені завдання вирішені. Основні положення дисертації належним чином висвітлені в опублікованих наукових працях, пройшли апробацію на конференціях, впроваджені в практичну діяльність. За сукупністю отриманих наукових результатів, їх актуальністю, новизною кваліфікаційна наукова праця відповідає вимогам діючого «Порядку присудження наукових ступенів», її автор **Ковецька Юліанна Юріївна** заслуговує присудження наукового ступеню доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика,

Д.т.н., професор,
зав.кафедри атомних електричних
станцій і інженерної теплофізики
КПІ імені Ігоря Сікорського

Валерій ТУЗ

“10” грудня 2020 р.

Підпис

д.т.н., професора Валерія ТУЗА
засвідчую

Вчений секретар

КПІ ім. Ігоря Сікорського



Валерія ХОЛЯВКО