

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА
д.т.н., с.и.с. Горобця Валерія Григоровича
на дисертаційну роботу **Ковецької Юліанни Юріївні**
«Теплообмін, гідродинаміка і нестійкість в пористих середовищах та
мікроканальних пристроях», яка подається на здобуття наукового ступеня
доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика.

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота присвячена актуальної темі розробці теоретичних засад для дослідження процесів теплообміну, гідродинаміки і нестійкості потоків в пористих мікроканалах з метою інтенсифікації теплообміну в елементах систем терморегулювання для підвищення їх теплотехнічної ефективності, надійності, зменшення маси і габаритів. Актуальність роботи полягає в розробці методів та отриманні результатів моделювання процесів теплообміну в мікроканалах, які необхідні при розробці та оптимізації пористих мікропристроїв, що застосовуються в енергетиці, мікроелектроніки, біології, медицині.

Структура та обсяг дисертації.

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

Оформлення дисертації, стиль викладу та мова дисертаційної роботи

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.

Стиль висловлювання та подача матеріалу досліджень є логічними, послідовними і зв'язаними єдиною цільовою спрямованістю. Стиль викладу матеріалу дисертації, висновків, наукових положень є притаманним науковим дослідженням. Мова дисертації лаконічна, термінологічно відповідає сучасним нормам, коректна та зрозуміла.



Зміст дисертації, об'єкт і предмет дослідження відповідають паспорту спеціальності 144 – Теплоенергетика як за формулою спеціальності, так і за напрямами досліджень.

Основний зміст роботи.

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

У першому розділі наведено огляд літературних джерел щодо перспектив використання пористих мікроканальних пристрій. Наведений аналіз літературних джерел показав актуальність досліджень теплообміну і гідродинаміки в мікроканальніх системах і пористих середовищах, необхідність ретельного вивчення теплофізичних процесів в пористих мікроканалах. Експериментальні дослідження тепло масообміну в мікроканалах провести досить складно, тому для вирішення поставлених задач необхідно розробити нові та удосконалити існуючі математичні моделі прогнозування впливу геометричних та фізичних факторів на теплообмінні процеси.

В другому розділі представлено аналітичні та чисельні методи моделювання теплофізичних процесів в пористих мікросистемах різної конфігурації.

Преш за все це система рівнянь Нав'є – Стокса, яка модифікується включенням в себе складових, що враховують пористість. Але зі зменшенням лінійних масштабів та збільшенням площин поверхні по відношенню до маси мікропристрою механізм перенесення маси, імпульсу та енергії набуває особливості, що пов'язано з впливом ефекту проковзування на стінках каналу. Тому вибір методу моделювання фізичних процесів залежить від діапазону зміни значень числа Кнудсена. В діапазоні чисел Кнудсена ($0,01 < Kn < 0,1$) тепломасобмін і гідродинаміка описується рівняннями Нав'є-Стокса з використанням граничних умов гідродинамічного та теплового проковзування першого та другого порядку. Використання граничних умов другого порядку надає можливість розширити діапазон чисел Кнудсена для використання математичної моделі, що базується на наближенні суцільного середовища.

Другим методом, що використовується в роботі для вирішення поставлених задач, є метод граток Больцмана. Цей метод розглядає течію як

рух ансамблю частинок, що мають деяку функцію розподілу за дискретними швидкостями. В основу методу граток Больцмана покладено ідею, що розташування однієї частинки є дискретним, щоб частинка могла займати це положення лише у вузлах граток. Форма комірок грат може бути довільною. Оскільки потрібно моделювати процеси як в плоскому каналі, так і в трубі, було використано два типи граток: для плоского каналу - двовимірна гратка $D2Q9$ з дев'ятьма напрямками швидкості, а для круглого каналу - тривимірна гратка $D3Q15$ з п'ятнадцятьма напрямками швидкості.

Рівняння Больцмана для руху та енергії прийнято у наближенні BGK (Bhatnagar, Gross, Krook), які вирішуються з граничними умовами проковзування першого та другого порядку. Для розв'язання дискретного рівняння Больцмана були створені комп'ютерні коди за допомогою відкритого коду "Palabos", розповсюдженого за загальною публічною ліцензією GNU Affero (www.palabos.org).

Дослідження процесів теплообміну в турбулентному потоці в мікроканалах проведено на основі ренормалізаційного групового методу (RNG) k-ε моделі турбулентності. При моделюванні турбулентного потоку основна система рівнянь з урахуванням пористості замикається рівняннями для кінетичної енергії турбулентності та швидкості дисипації енергії. Теорія RNG дає можливість виявити фізичну сутність впливу нелінійної складової Форхаймера на структуру турбулентного потоку. Цей метод дозволяє чисельно досліджувати процес течії в пористому середовищі і визначити турбулентні параметри потоку.

Для вивчення гідродинамічної та теплової нестійкості в пористих мікроканалах застосовується метод малих лінійних збурень. Цей метод адаптовано для аналізу різноманітних видів гідродинамічної та теплової нестійкості, зокрема відцентрової нестійкості.

Третій розділ присвячено аналізу гідродинамічної нестійкості течії в пласкому та криволінійному пористих мікроканалах.

Методом малих лінійних збурень досліджено особливості течії розрідженоого потоку з проковзуванням в пласкому пористому каналі. Визначено вплив пористості та числа Кнудсена на критичні параметри стійкості ламінарної течії розрідженоого потоку в пористому каналі. Показано, що збільшення числа Кнудсена і зменшення проникності, призводить до зменшення критичного хвильового числа. Це вказує на те, що критична довжина хвилі збурення збільшується. Тобто довгохвильові збурення є більш небезпечними для стійкості потоку.

Проведено аналіз гідродинамічної нестійкості течії без проковзування на основі тривимірних лінійних збурень в пласкому пористому каналі.

Визначено вплив пористості на критичне значення числа Рейнольдса Re_{cr} . Зі зменшенням пористості профіль швидкості стає більш заповненим і це, згідно з другою теоремою Релея про стійкість руху потоку, призводить до стабілізації течії і до збільшення значення критичного числа Рейнольдса.

Розглянуто можливість використання методу RNG для отримання значення кінематичної в'язкості турбулентного потоку в пористому середовищі. Визначено умови виродження турбулентності. Зроблено порівняний аналіз стійкості двовимірного та тривимірного турбулентних потоків. Показано, що тривимірний потік є менш стійкій в порівнянні з двовимірним.

Методом малих лінійних збурень досліджено нестійкість потоку з проковзуванням в криволінійному пористому мікроканалі між двома нерухомими концентричними циліндрами (течія Діна). Показано, що збільшення коефіцієнта проковзування, пористості середовища і ширини каналу призводить до збільшення критичних значень числа Діна і критичної довжини хвилі збурення, які визначають критерії нестійкості потоку. Це пов'язано зі збільшенням заповнованості профілю швидкості незбуреного потоку (профіль стає більш пласким).

У четвертому розділі представлені результати аналітичного рішення і чисельного моделювання на основі метода граток Больцмана (LBM) змішаної та примусової конвекції в пласких та круглих пористих мікроканалах для різних граничних умов проковзування.

Розглянуто задачу впливу змішаної конвекції на теплообмін при розвиненому ламінарному плині в вертикальних пласкому та круглому пористих мікроканалах з постійним тепловим потоком на стінках. Математична модель теплообміну та гідродинаміки включає рівняння Нав'є-Стокса для пористого середовища з граничними умовами проковзування першого порядку. Отримано аналітичне рішення для профілів швидкості, температури, коефіцієнтів тепловіддачі і гіdraulічного опору. Представлено також вирішення задачі з використанням чисельного підходу, заснованого на методі граток Больцмана (LBM).

Аналіз отриманих результатів показує, що вплив числа Кнудсена більш виражено в пристіночній області, збільшення числа Кнудсена супроводжується стрибками швидкості на стінці. У центральній частині каналу переважає вплив числа Релея, тобто природної конвекції. Зі зменшенням проникності швидкість потоку зменшується, профіль швидкості стає більш заповненим. При високих числах Релея профіль швидкості стає М-подібний і мінімум швидкості виникає на осі каналу. В круглому каналі ця

тенденція виражена більш яскраво ніж в плоскому. Надано пояснення цьому ефекту.

Проаналізовано вплив фізичних параметрів на тепловіддачу. Для всіх комбінацій безрозмірних критеріїв збільшення числа Кнудсена знижує інтенсивність теплообміну для каналів обох геометрій. Це пов'язано зі збільшенням стрибка температури на стінці, що викликає погіршення умов теплового взаємодії між рідиною і стінкою. Показано динаміку зміни коефіцієнта тепловіддачі з ростом числа Релея, яка свідчить про те, що існує інверсія впливу пористості на тепловіддачу. При малих числах Релея зменшення проникності збільшує теплопередачу, при великих значеннях чисел Релея тенденція змінюється на протилежну. Дано пояснення цьому результату. Окрім тепловіддачі досліджено також гідравлічний опір, який описується рівнянням Дарсі-Вейбаха. Для низьких чисел Релея зі збільшенням числа Кнудсена гідравлічний опір зменшується (зі збільшенням ефекту проковзування) і зростає зі збільшенням пористості. Зміна гідравлічного опору з ростом числа Релея показує, що існує інверсія впливу пористості. Починаючи з певних значень числа Релея збільшення числа Кнудсена призводить до збільшення гідравлічного опору, що пов'язано зі збільшенням градієнта швидкості на стінці.

Порівняння результатів, отриманих аналітичним методом, з чисельними результатами на основі методу решіток Больцмана показало, що змішана конвекція в пористому мікроканалі може бути успішно змодельована з використанням методології LBM. Відхилення чисельних результатів від аналітичного рішення менше 1%.

Досліджено особливості примусової конвекції у пласкому і круглому горизонтальному пористому мікроканалі. Розглядається стаціонарна задача в разі повністю розвиненої ламінарної течії. На стінках каналів задається постійний тепловий потік. Задача вирішувалась на основі системі рівнянь Нав'є-Стокса для пористого середовища з граничними умовами проковзування другого порядку що дозволило при моделюванні розширити діапазон зміни числа Кнудсена до 0,2. Отримано аналітичне рішення для профілів швидкості, температури з різними граничними умовами проковзування на стінках. Представлено також вирішення задачі з використанням чисельного підходу, заснованого на методі граток Больцмана.

Проаналізовано вплив різних значень пористості і констант A_2 в граничних умовах проковзування другого порядку на параметри потоку и тепловіддачу. Зі зменшенням пористості швидкість потоку в центральній частині мікроканалу та швидкість проковзування на стінці (стрибок швидкості) зменшуються за рахунок збільшення гідродинамічного опору. У

випадку граничних умов другого порядку, швидкість стрибка на стіні помітно залежить від параметра A_2 . Стрибок швидкості зменшується для позитивних значень A_2 , тоді як для негативних значень A_2 стрибок швидкості збільшується порівняно з випадком $A_2 = 0$ (граничні умови первого порядку). Порівняння аналітичного рішення з чисельним моделюванням показало, що для $A_2 \geq 0$ ці результати добре узгоджуються між собою (відмінності не перевищують 1%). При $A_2 < 0$ результати чисельних моделювань перевищують аналітичне рішення, тоді як для $A_2 \geq 0$, навпаки.

Подібні ефекти впливу пористості та граничних умов проковзування другого порядку також спостерігалися щодо температурних профілів. Розрахунки чисел Нуссельта показали, що зменшення пористості викликає посилення теплопередачі.

Показано, що вплив числа Прандтля на теплообмін аналогічний з впливом пористості. При малих числах Прандтля переважає ефект проковзування. Зі збільшенням числа Прандтля стрибок температури на стіні слабшає, що випливає з граничних умов. При високих значеннях числа Прандтля він практично вироджується.

Дано порівняння процесів теплообміну в пласкому та круглому пористих мікроканалах. Показано, що структури потоку рідини та теплопередачі в плоских та круглих мікроканалах подібні, але більш виражені в круглому мікроканалі.

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

Розглянуті в роботі задачі актуальні, отримані результати достатньо обґрунтовані. Їх достовірність визначається використанням фундаментальних математичних моделей та сучасних методів (аналітичних та чисельних) для вирішення задач. Результати дисертаційної роботи повною мірою відображені в статтях, що опубліковано у наукових фахових виданнях, які відповідають профілю. В цілому в роботі показано, що запропоновані методи дозволяють аналізувати вплив фізичних параметрів та режимів течії на нестійкість, теплообмін та гідродинаміку потоку в мікроканалах, що дає змогу розробляти нові і оптимізувати існуючі пристрой і технології.

Наукова новизна отриманих результатів.

В дисертації отримані наступні наукові результати:

1. Вперше розвинуто метод граток Больцмана для проведення досліджень теплообміну та гідродинаміки в пористих мікроканалах

різної конфігурації з урахуванням умов проковзування першого та другого порядку точності.

2. Вперше отримано аналітичні та чисельні результати при дослідженні змішаної та примусової конвекції з урахуванням умов проковзування першого та другого порядку точності.
3. Розвинуто методи дослідження відцентрової нестійкості ламінарної течії в криволінійному пористому мікроканалі між двома нерухомими циліндричними поверхнями.
4. Розширено аналіз впливу пористості та проковзування на стійкість ламінарної течії в пласкому каналі.

Практичне значення одержаних результатів

Основні результати досліджень знайшли практичне застосування в рамках договору «Розрахунок тепломасообмінних та гідродинамічних процесів у мікроканалах сенсорів тиску» при оптимізації процесів в системах сенсорів тиску, які можуть застосовуватися виробниками датчиків (перетворювачів) тиску в якості чутливих елементів приладів у промисловості. Є акт використання результатів роботи в ДП СКТБ. Також результати розрахунків були використані в процесі оптимального вибору будівельних матеріалів з метою зменшення втрат тепла крізь огорожувальні конструкції будівель. Є акт використання результатів роботи в ТОВ «Монолітбуд 2001».

Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій 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 результатів. Результати досліджень оприлюднені в 3 доповідях на наукових конференціях.

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. При дослідженні та чисельному моделюванню процесів тепло- і масопереносу в мікроканалах число Прандтля варіувалось від 0,7 до 10. При цьому вивчено вплив числа Кнудсена на теплообмін, який обумовлений розрідженням теплоносія біля стінки або ефектом проковзування. Якщо для газового теплоносія цей ефект має фізичне пояснення, то для рідин не розкритий фізичний механізм ефектів проковзування.
2. В роботі досліджуються мікроканали простої геометрії, пласкі і циліндричні канали. В той же час для реальних об'єктів пористі структури мають складну геометрію. Які похибки виникають при застосуванні і практичному впровадженні отриманих результатів для реальних об'єктів, будівельних матеріалів, мікроканалів в системах охолодження, тощо.
3. Не надається пояснення збільшенню розбіжностей в результатах чисельного і аналітичного рішення задачі дослідження примусової конвекції в пористих мікроканалах в разі використання граничних умов проковзування другого порядку.
4. Потребує пояснень які результати роботи було використано для впровадження.
5. З дисертації незрозуміло, чому при дослідженні гідродинамічної нестійкості в пористих середовищах використовується тривимірне наближення.
6. В дисертації недостатня кількість порівнянь отриманих чисельних результатів з експериментальними даними. Є лише окремі порівняння з даними інших авторів (див. наприклад рис. 3.1.1 стор. 72).
7. На стор. 47 зазначено значення вагових коефіцієнтів w_j , але не вказано їх походження.
8. В тексті дисертації є ряд неточностей та граматичних помилок:

в тексті дисертації використовуються вирази «лініарізуя» (стор. 81) – потрібно «лінеаризуючи»; «середньорасходной швидкості»(стор. 97) - потрібно «середньовитратної швидкості»; «расходження» (стор. 112) – потрібно «розвідженість» та інші неточності.

Загальний висновок та відповідність дисертації вимогам

В цілому, зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи і не зменшують цінність отриманих результатів. Це дозволяє кваліфікувати дисертаційну роботу як завершену наукову працю, яка задовольняє вимогам п.п. 9-11 «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету міністрів України №167 від 06.03.2019р. та Наказом МОН України №40 від 12 січня 2017р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій», а її автор, Ковецька Юліанна Юріївна, заслуговує присудження наукового ступеню доктора філософії за спеціальністю 144 – теплоенергетика.

Офіційний опонент:

Доктор технічних наук,
старший науковий співробітник,
завідувач кафедри теплоенергетики
Національного університету біоресурсів
і природокористування України

В.Г. Горобець

