

ВІДГУК

офіційного опонента,
д.т.н., професора кафедри АЕС і ІТФ КПІ ім. Ігоря Сікорського
Туза В.О.

на дисертаційну роботу Кравчука Олександра Вікторовича
«Тепломасообмін та гідродинаміка однорідних та нанорідин
в мікроканалах різної конфігурації»,
яку подано на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за
спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

В дисертаційній роботі пана Кравчука О.В. 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 пана Кравчука О.В.

1. Актуальність обраної теми

Необхідність дослідження процесів тепломасообміну в мікроканалах при використанні у якості теплоносія рідин і нанорідин умовлено тим, що при зменшенні геометричних розмірів каналів частіше за все має місце висока густина тепловиділення. Для дослідження теплофізичних процесів необхідно розуміння структури потоку і рушійних сил процесів. У звичайних умовах течія рідини і нерозріджених газів достатньо точно описуються методами механіки суцільного середовища. Однак у мікро- і наноканалах, а також в присутності наночасток, ситуація істотно змінюється. Мікроканалами прийнято вважати канали, у яких один з характерних розмірів (наприклад, висота каналу або діаметр циліндричного) має порядок менший за сотні мікрон. У цих умовах течії мають свої особливості. У діапазоні чисел Кнудсена $10^{-2} \dots 10^2$ течія вже не описується рівняннями гідродинаміки та тепломасообміну суцільних середовищ. Таким



чином, для їх моделювання неможливо застосовувати звичайні гідродинамічні методи.

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.

2. Коротка характеристика змісту роботи

Структура та обсяг роботи

Дисертація включає вступ, чотири розділи, висновки та список використаних літературних джерел. Загальний обсяг дисертації складає 181 сторінку, з них 149 сторінок основного тексту, 57 рисунків, 1 таблицю, список літератури включає 105 найменувань.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено її зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету і основні завдання досліджень, розглянуто об'єкт, предмет та методи досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про апробацію результатів дисертаційної роботи. Представлені відомості про особистий внесок автора, опубліковані результати, структуру та обсяг роботи.

У *першому* розділі наведено результати аналізу літературних джерел. Автор відмічає, що скорочення геометричних масштабів робить міжфазні та електрокінетичні явища набагато складнішими, а також зменшує значення впливу гравітації та тиску. Вплив граничної умови без проковзування передбачений для макроскопічних потоків, може виявитися неточним, коли характерний розмір системи достатньо малий. Хоча значення числа Рейнольдса, характерне для більшості цих потоків, усуває проблеми нелінійності в конвективних доданках та пов'язані із цим труднощі при моделюванні турбулентних течій.

Мікромасштабні потоки, як правило, являються ламінарними завдяки розмірами системи, але можуть мати великі числа Пекле, які приводять до низького рівня дифузії макромолекул. Рухом теплоносія можна керувати тиском, але застосування електричних полів є більш зручними для керування цими системами.

Тепломасообмін та гідромеханіка для газів зазвичай моделюється шляхом включення граничних умов гідродинамічного та теплового проковзування, в'язкої дисипації, а також врахуванням ефектів стисливості в рівнянь руху суцільного середовища. Для певних діапазонів робочих параметрів можливо використування молекулярних методів, або методів, заснованих на кінетичній теорії газів, що втілені в рівнянні Больцмана. а також прямі методи моделювання, такі як метод Монте-Карло.

Механіка рідин в мікроканалах є більш складною. Молекули більш щільно упаковані при нормальному¹ тиску і температурі, а також більшими є потенціали притягування або зчеплення між молекулами рідини, та між рідкою і твердою фазами, як що характерний розмір потоку досить малий.

За результатами проведенного аналізу літературних джерел автором виявлені особливості процесів в мікроканалах і сформульовані задачі досліджень.

У другому розділі розглянуто методи моделювання тепломасообмінних процесів та гідродинаміки в мікроканалах.

В розділі виконано аналіз моделі Бонжорно, яка представляє собою систему модифікованих рівнянь Нав'є-Стокса і Фур'є-Кіргофа. Система диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса в часткових похідних, що описує рух в'язкої ньютонівської рідини, це рівняння Нав'є-Стокса. Рівняння конвективного теплообміну, відоме як рівняння Фур'є-Кіргофа, дозволяє визначити розподіл температур в рухомому потоці рідини або газу.

Для врахування впливу проковзування на стінках пропонується використовувати граничні умови при моделюванні течій в діапазоні чисел Кнудсена $10^{-3} \leq Kn \leq 0,1$.

В роботі розглянуто Метод Монте-Карло, який використовується для вирішення завдань, що описуються лінійними диференціальними рівняннями з лінійними граничними умовами, цей метод може бути використаний в задачах з нелінійними граничними умовами. Крім того, за допомогою методу Монте-Карло можливо визначати температуру в будь-який окремо взятої точці досліджуваної області без розрахунку всього поля температур, що необхідно робити при використанні інших методів.

Автор зазначає, що у порівнянні з традиційними методами CFD, які вирішують макроскопічні рівняння переносу потоку рідини, маси і тепла, метод LBM використовує кінетичне рівняння Больцмана і відповідні залежності між фактичною модельною статистичною динамікою на мікроскопічному рівні і рівняння переносу на макроскопічному рівні. Перевагами LBM методу є прості процедури обчислення, які застосовуються для паралельних обчислень; легкість і надійність при роботі з багатофазним потоком, складною геометрією, міжфазною динамікою.

Для дослідження гідродинамічної та теплої нестійкості автором пропанується використовувати метод збурень. Найпоширеніші види такої нестійкості це ламінарно – турбулентний перехід, різноманітні види вільної конвекції та біоконвекції, відцентрова нестійкість та інші.

Основою дослідження стійкості течій в'язкої нестисливої рідини є система рівнянь руху Нав'є-Стокса і рівняння нерозривності. Розв'язок цієї системи при конкретних граничних умовах представляється в вигляді залежностей для основної течії, стійкість якої підлягає розгляду, і збуреної складової, накладеної на основну.

На підставі проведеного аналізу автором для розв'язання математичних моделей обрані наступні методи: метод Монте-Карло, метод решіток Больцмана та метод збурень.

Метод Монте-Карло дає можливість швидко отримувати результати дослідження теплообміну в локальній точці. В дисертаційній роботі описано алгоритм дослідження теплообміну нанорідин в плоскому каналі та граничному шарі на плоскій пластині, який базується на методі Монте-Карло.

Метод решіток Больцмана застосовується в області обчислювальної гідродинаміки. LBM використовує кінетичне рівняння Больцмана, яке представлене в спрощеній формі. Це рівняння встановлює зв'язок між фактичною динамікою на мікроскопічному рівні і рівняння переносу на макроскопічному рівні. В роботі описано послідовність ітерацій для двовимірних та трьохвимірних задач.

Метод збурень автором застосовується для вивчення гідродинамічної та теплої нестійкості. Метод збурень адаптовано для аналізу різноманітних видів

гідродинамічної та теплової нестійкості, зокрема відцентрової. Для реалізації методу збурень застосовуються різні чисельні підходи, зокрема для знаходження критеріїв відцентрової нестійкості можуть бути використані метод кінцевих різниць, або методи Гальоркіна.

У третьому розділі наведені результати дослідження процесів гідродинаміки і тепломасообміну змішаної природної та вимушеної конвекції у розвиненому ламінарному потоці у вертикальному каналі методом решіток Больцмана.

Автор поєднав макропараметри граничних умов з мікропараметрами функції розподілу. У представлений моделі сформульовані граничні умови: умова швидкості проковзування на стінці та періодичні межові умови для вхідного/вихідного перерізу. Періодичні межові умови накладаються у напрямку потоку шляхом обробки вхідних / вихідних комірок. Таким чином, накладання періодичних умов виконується як частина потокової операції так, що обчислені розподіли на виході решітки переносяться на вхід сусідньої в якості заданих граничних умов.

Результати виконаних обчислень дозволили зробити висновок, що число Прандтля не впливає на профілі швидкості для всіх значень чисел Релея та Прандтля.

Для всіх чисел Кнудсена $Kn=0, 0.05$ і 0.1 при збільшенні числа Релея приводить до згладжування температурних профілів. Тобто локальна температура рідини в поперечному перерізі каналу наближається до температури на стінці. Крім того, на відміну від профілів швидкості, для більших чисел Релея величина градієнта температури на стінці також зменшується.

Автором у розділі представлені результати дослідження гідродинаміки течії в мукроканалах.

У випадку малих чисел Релея, збільшення числа Кнудсена (тобто збільшення ефекту проковзування) сприяє зменшення гіdraulічного опіру. При більших значеннях чисел Релея кут нахилу нахил кривих зменшується, що означає послаблення ефекту проковзування.

Крім того, починаючи з деяких значень чисел Релея, збільшення числа Кнудсена викликає збільшення гіdraulічного опору. Наприклад, це можна

спостерігати для $Kn > 0.065$ і $Ra \sim 10$. У випадку більших чисел Релея, таких як $Ra = 100$, гідравлічний опір швидко зростає при збільшенні числа Кнудсена $Kn \geq 0$. Ця тенденція аналогічна зміни числа Нуссельта при високих значеннях чисел Релея та Прандтля і обумовлено тим, що збільшення числа Релея викликає збільшення градієнта швидкості на стінці.

Результати моделювання процесів гідродинаміки і теплообміну при змішаній конвекції в мікроканалах показали адекватність застосування методу решіток Бульцмана.

Крім того, автором представлено результати досліджень гідродинаміки і теплообміну при змішаній конвекції в розвиненому двомірному ламінарному потоці. При використанні методу решіток Бульцмана було застосовано тривимірну решітку D3Q15, тоді як для плоского каналу було достатньо спрощеної двовимірної решітки D2Q9.

Аналіз результатів дослідження показав, що для середнього значення числа Релея, швидкість потоку біля стінки каналу зростає зі збільшенням числа Кнудсена. В той же час у центральній частині каналу тенденція протилежна: локальні швидкості рідини в поперечному перерізі каналу, а також максимальна швидкість на осі каналу, зменшується зі збільшенням числа Кнудсена. Отже найбільше значення максимальної швидкості на осі каналу спостерігається для потоку без проковзування, тобто для $Kn = 0$.

Для максимального числа Релея, розглянутого в дисертаційній роботі $Ra = 200$, профіль швидкості стає М-подібним, мінімальне значення швидкості спостерігається на осі каналу.

Результати розрахунків показали, що профілі швидкості не залежать від числа Прандтля для всіх значень діапазону чисел Релея та Прандтля.

В діапазоні зміни числа Кнудсена від 0 до 0.1, температурні профілі вирівнюються внаслідок збільшення числа Релея. Тобто, температура рідини в поперечному перерізі каналу наближається до локальної температури стінки. У той же час, на відміну від профілів швидкості, для більших значень чисел Релея величина збільшення температури на стінці також зменшується. Ця тенденція зберігається у всьому діапазоні зміни чисел Кнудсена.

У роботі представлені результати дослідження відцентрової нестійкості в зазорі в криволінійному каналі, який утворено двома концентричними циліндричними поверхнями при течії нанорідини. Розглянуто течію біля внутрішньої поверхні і течію в криволінійному каналі з рухомими стінками, коли рух рідини здійснюється за рахунок азимутального сталого градієнту тиску. В першому випадку критерієм нестійкості є число Тейлора, а у другому – число Діна.

При моделюванні явищ переносу в потоці нанорідини автор застосував в математичному описі процесу додатково рівняння концентрації наночастинок з урахуванням броунівської дифузії та термофорезу.

Для дослідження гідродинаміки, тепло- і масообміну та визначення критичного числа Тейлора був выбраний метод решіток Больцмана (LBM-Lattice Boltzmann Method). Значення критичних чисел визначалось за параметрами течії в момент виникнення її нестабільності.

Розрахунки параметрів течії нанорідини на основі методу решіток Больцмана дозволили отримати незбурені та збурені характеристики гідродинаміки та тепломасообміну у зазорі, який утворено двома концентричними циліндричними поверхнями з внутрішньою поверхнею, що обертається.

Результати дослідження впливу числа Прандтля на відцентрову нестабільність показали, що ефект обертання має різний вплив в області стабільних температурних градієнтів та області нестабільних температурних градієнтів.

Результати, які представлені в розділі, були перевірені автором за допомогою теорії збурень. Для цього була отримана лінеарізована система рівнянь для збурюючих амплітуд.

Дисертантом виконано моделювання розвиненого турбулентного потоку в мікроканалі, який обертається, та проведена фізична інтерпретація структури потоку. Аналітичне рішення математичної моделі було виконано у спрощеній двомірній постановці задачі в поєднанні з тривимірним числовим рішенням, що базується на методі LBM. Турбулентність моделювалася на базі моделі Смогорінського, яка була пристосована до методу LBM.

Аналіз результатів аналітичних та чисельних розрахунків показав, що ефекти обертання та проковзування мають суттєвий вплив на потік рідини в каналі. Обертання також впливає на формування профілю швидкості, починаючи з певної відстані від стінки. У той же час, проковзування впливає на формування профілю швидкості в області, безпосередньо прилеглій до стінки каналу. Вплив обох факторів залежить один від одного.

На підставі аналізу результатів проведених досліджень автором зроблені висновки.

У четвертому розділі представлено алгоритм дослідження процесу теплообміну при стаціонарній течії рідини в плоскому мікроканалі, який базується на методі Монте-Карло.

Представлені результати чисельного моделювання методом Монте-Карло процесу теплообміну нанорідини в межовому шарі на плоскій пластині при ламінарній і турбулентній течії в стаціонарних умовах. Алгоритми дослідження теплообміну нанорідини в граничному шарі є модифікацією алгоритму для плоского мікроканалу і базується на звичайній (для ламінарного режиму) і розширеній (для турбулентного) системах диференціальних рівнянь Бонжорно.

Чисельні розрахунки показали, що додавання незначної кількості наночастинок в рідину призводить до збільшення інтенсивності теплообміну за лінійним законом в залежності від об'ємної частки наночастинок. Залежність відносного числа Нуссельта від безрозмірного коефіцієнта тепlopровідності є нелінійною за характером.

Збільшення числа Прандтля сприяє зниженню інтенсивності теплообміну. Збільшення параметру, який характеризує відношення термодифузії до концентраційної дифузії сприяє інтенсифікації теплообміну. Встановлено, що вплив зміни значення числа Льюїса, а також числа Пекле на інтенсивність теплообміну незначний.

Залежність відносного числа Нуссельта від об'ємної частки наночастинок в турбулентному потоці нанорідини також носить нелінійний характер. Вплив значень чисел Шмідта, Льюїса, Рейнольдса та Прандтля на зміну відносного коефіцієнта тепловіддачі несуттєвий.

У висновках наводиться перелік основних наукових і практичних результатів, одержаних у дисертаційній роботі.

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

Наукова новизна і значимість отриманих результатів

З моєї точки зору найбільш суттєві наукові результати роботи Кравчука О.В. полягають в наступному.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше запропоновано алгоритм чисельного дослідження теплообміну однорідної рідини та нанорідин, який базується на методі Монте-Карло;
- на основі запропонованого методу проведено чисельні експерименти з дослідження теплообміну у плоскому мікроканалі та примежевому шарі при різних параметрах потоку; виконано аналіз та узагальнення отриманих результатів;
- розвинуто метод решіток Бульцмана для проведення дослідження змішаної конвекції в вертикальному та циліндричному плоскому мікроканалі з урахуванням впливу наночасток, в результаті отримано профілі швидкостей, температур і значення числа Нуссельта;
- вперше чисельно досліджено відцентрову нестійкість в зазорі течії нанорідини в криволінійному каналі, утвореному двома концентричними циліндричними поверхнями;
- вперше виконано математичне моделювання розвиненого турбулентного потоку в мікроканалі, що обертається, та проведена фізична інтерпретація структури потоку.

Обґрунтованість і достовірність основних положень дисертації.

Основні результати, положення і висновки дисертації базуються на результатах чисельного дослідження. Дослідження проведені автором ґрунтуються 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.

Практичне значення отриманих результатів.

Робота виконувалася відповідно до тем відділу Інституту технічної теплофізики НАН У:

- 1.7.1.862 «Дослідження інтенсифікації тепло масообміну при фазових переходах та дискретно-іпульсном введені енергії в гетерогенних середовищах методами молекулярного та експериментального моделювання» (2015 – 2019 р. №ДР 0115U001029);
- 1.7.1.878 «Аеродинаміка та теплообмін в світлопрозорих конструкціях при їх взаємодії з тепловим випромінюванням» (2017 – 2021 р. №ДР 0117U000832);
 - 1.7.1.886 «Термогіdraulічна нестійкість потоків теплоносіїв та розробка теплофізичних механізмів подолання її руйнівного впливу на елементи енергетичного обладнання» (2018 – 2019 р. №ДР 0118U002192).

Описані в дисертації методи можуть використовуватися для визначення характеристик теплообміну і гідродинаміки рідин та нанорідин з різними параметрами течії та різною геометрією каналу. Враховуючи результати розрахунків, які представлені в дисертації, можна підібрати такі параметри рідини, що забезпечать необхідну інтенсивність теплообміну в системах охолодження пристройів з малими геометричними розмірами.

На основі описаного алгоритму проведено розрахунки тепло- і воловогообміну в будівельних конструкціях, і отримано відповідний акт про використання результатів роботи в ТОВ «Монолітбуд-2001», проведено розрахунки тепломасообмінних та гідродинамічних процесів у мікроканалах сенсорів тиску, і отримано відповідний акт про використання результатів роботи в ДП СКТБ.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати роботи представлені та обговорені на: міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми фізико-математичної освіти і науки». Дослідження в галузі теплофізики дисперсних і полімерних матеріалів, «Монте–Карло моделирование теплообмена наножидкости в канале», Київ, 2017р; X Міжнародна конференція «Проблеми теплофізики та теплоенергетики». Фундаментальні дослідження в теплофізиці і

теплоенергетиці, «Монте–Карло моделирование теплообмена наножидкости в канале», Київ, 2017р.

Публікації

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 17 наукових роботах, в тому числі, в 8 статтях спеціалізованих видань, що входять у перелік ДАК МОН України; в 1 статті в закордонних виданнях; в 6 статтях, які представлені у виданнях, включених у перелік наукометричних баз даних: Scopus, Web of Science (Clarivate Analytics); у 2 тезах доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Дисертація є закінченою науковою працею, що виконана у вигляді рукопису. Дисертація відповідає вимогам «Постанови КМ від 24.07.2013 №567 пп. 9, 10, 12, 13», що їх пред'являють до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Стиль викладення наукового матеріалу забезпечує його чітке та однозначне розуміння.

Автореферат написано докладно, добре ілюстровано і він повністю відповідає змісту дисертації. Всі основні положення і висновки, що містяться в дисертації, відображені в авторефераті.

3.Зауваження по дисертації

1. Бажано при дослідженні процесів тепломасообміну в мікроканалах для характеристики робочого тіла використовувати не тільки число Кнудсена, а надавати додаткову інформацію, яка характеризує умови однозначності математичного опису процесу.
2. Моделюванні течії в мікроканалах потребує більш обґрунтованого пояснення зв'язок числа Кнудсена з часом релаксації (формула (3.1.10)).
3. При співставленні результатів чисельного розрахунку з даними, наведеними в літературі [72] автор отримує достатньо точне співпадіння ($Nu = 8,235$). Бажано виконати порівняльний аналіз з рішенням подібної задачі, яка представлена в класичній літературі, наприклад Ісаченко В.П. та інш. Теплопередача ($Nu = 4,36$ при $q_{ct} = \text{const}$).
4. При перетворенні граничних умов математичної моделі змішаної конвекції в вертикальному циліндричному мікроканалі до безрозмірного виду не надані

пояснення, як визначається коефіцієнт в'язкого ковзання γ (формула (3.2.26) для визначення числа Кнудсена).

5. В роботі не надані достатньо обґрунтовані пояснення впливу на профіль швидкості в вертикальному циліндричному мікроканалі природної конвекції при зміні Ra від 0,001 до 50 і зміни форми профілю швидкості при $Ra = 200$ (рис.3.2.3). Чим пояснюється перетин кривих безрозмірних профілів швидкості у вертикальному циліндричному мікроканалі в точці $r \approx 0,65$ (рис.3.2.4)?
6. При дослідженні впливу природної конвекції на інтенсивність загального теплообміну при русі рідини в мікроканалах автор використовує залежність (3.2.48), яка дає кількісну оцінку впливу природної конвекції на теплообмін за рахунок змішаної конвекції для потоку без проковзування при $Kn = 0$ в діапазоні $Ra = 0...100$, але не надає посилання на джерело і в чому полягає відмінність результатів.
7. При моделюванні процесів тепломасообміну в мікроканалах з нанорідинами для визначення критичних значень чисел Тейлора і Діна використовуються безрозмірні параметри. Для скорочення чисельності використаних безрозмірних параметрах доречно використати π -теорему.
8. При виконанні чисельних експериментів необхідно виконати верифікацію представлених моделей і провести аналіз похибки отриманих результатів.

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, яка виконана на високому науковому рівні, з закінченим науковим дослідженням орієнтованим на вирішення важливої науково-технічної задачі, що полягає у вирішенні актуальної проблеми моделювання тепломасообміну та гідродинаміки в мікроканалах різної геометрії з потоком рідин та нанорідин.

Робота виконана на сучасному науковому рівні, а одержані результати мають наукову новизну та практичну цінність. Сформульовані в роботі наукові висновки характеризуються високим ступенем обґрунтованості.

Викладене дозволяє вважати, що дисертація повністю відповідає постанові Кабінету міністрів № 567 від 24.07 2013 (зі змінами, затвердженими постановою

Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2015 р. № 656) та вимогам п. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» МОН України щодо кандидатських дисертацій, а її автор Кравчук Олександр Вікторович заслуговує присудження ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Д.т.н., професор,
зав.кафедри атомних електричних
станцій і інженерної теплофізики
Національного технічного університету
України „Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського”

B.O.Tyz

“ ” жовтня 2019 р.

Підпис

д.т.н., професора В.О.Туза
засвідчую
Вчений секретар
КПІ ім. Ігоря Сікорського



А.А.Мельниченко