

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора фізико-математичних наук, професора Гаврюшенка Дмитра Анатолійовича на дисертаційну роботу кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Тирінова Андрія Івановича «Тепломасообмін та гідродинаміка теплотехнічних мікро- та наносистем», представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

В дисертаційній роботі Тирінова А. І. розглядаються питання, що стосуються процесів вивчення мікро-та наномасштабних течій з використанням аналітичних та чисельних методів моделювання. Ця проблема виникає у зв'язку з подальшою мініатюризацією пристроїв та технологій. Створення нового обладнання вимагає розуміння процесів, що в ньому протікають. Але мініатюрні розміри значно ускладнюють, або й взагалі унеможливають експериментальні дослідження. Тому моделювання є чи не єдиним можливим способом їх вивчення. Вирішенню цих проблем присвячена дисертаційна робота Тирінова А. І.

I. Актуальність теми дисертаційної роботи

При переході до мікро- і наномасштабів дуже часто виникає надвисока щільність тепловиділення і з'являється необхідність інтенсивного відведення тепла протягом малих проміжків часу.

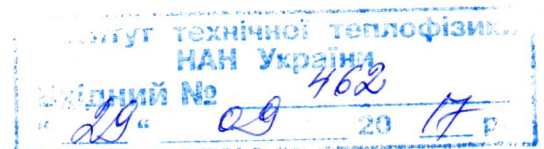
Малі розміри мікро- і наносистем надзвичайно ускладнюють експериментальні дослідження їх тепломасообміну. Традиційні вимірювальні пристрої вносять сильні збурення, порівнянні з вимірюваними величинами. Експериментально вдається виміряти лише інтегральні властивості течії: середні значення температур та швидкостей, витрату рідини при заданому градієнті тиску, падіння тиску і т. п.

Однак, для використання такого обладнання необхідно розуміти механізми процесів та структуру потоку. Тому важливе місце при вивченні тепломасообміну в мікро- нанопристроях та нанорідинах відіграє математичне моделювання. Але в цих умовах течії мають свої особливості. Потік вже не описується рівняннями гідродинаміки та тепломасообміну суцільних середовищ і для їх моделювання неможливо застосовувати традиційні підходи та гідродинамічні методи.

Отже, створення та адаптація аналітичних та чисельних методів моделювання мікро- і наносистем є актуальною задачею.

II. Коротка характеристика змісту роботи

Дисертація має структуру завершеної науково-дослідної роботи. Текст дисертації складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 254 найменувань та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 358 сторінок машинописного тексту. Робота містить 118 рисунків та 11 таблиць.



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. Наведено відомості про особистий внесок автора, опубліковані результати, структуру та обсяг роботи.

У *першому* розділі наведено результати аналізу літературних джерел, в яких розглядається сучасний стан моделювання мікро- та наномасштабних потоків. Розглянуто особливості тепломасообмінних процесів у таких системах. Визначено критерії, що обумовлюють масштабний поділ та класифікацію систем.

За результатами проведеного аналізу літературних джерел формулюється тема дисертації і задачі досліджень.

У *другому* розділі розглянуто існуючі методи моделювання тепломасообмінних процесів та гідродинаміки в мікро- та наносистемах.

Для моделювання процесів з нанорідинами найбільш адекватною на даний час є модель Buongiorno. Модель враховує температурну й броунівську дифузію, а також параметри наночастинок.

Чисельні розрахунки мікро- та мезомасштабних потоків пропонується провадити за допомогою методу ґрат Больцмана з застосуванням граничних умов проковзування на стінках. В методі положення часток передбачається дискретним, тобто частка може займати положення тільки у вузлах заданих ґрат. Напрями руху часток також вважаються дискретними. Форма комірок ґрат може бути обрана довільно, але для декартових координат найбільш прийнятною є прямокутна форма. Найчастіше при двовимірному моделюванні використовують ґрати D2Q9 на дев'ять каналів руху, а при тривимірному - D3Q15 на п'ятнадцять.

Одним з найпоширеніших методів комп'ютерного моделювання фізичних процесів на нанорівні є метод молекулярної динаміки. Метод заснований на чисельному розв'язанні класичних рівнянь руху атомів у деякому виділеному об'ємі середовища. Для кожного атома записується рівняння руху у вигляді другого закону Ньютона.

Динаміка дисипативних частинок являє собою стохастичний метод моделювання динамічних і реологічних властивостей простих і складних рідин.

У *третьому розділі* розглядаються аналіз тепломасообміну та гідродинаміки при плівковій конденсації та кипінні нанорідин. Для цього в даній роботі вперше було використано модель J. Buongiorno. Модель адаптовано автором шляхом додавання граничної умови зміни витрати рідини за рахунок фазового переходу.

Аналітично було отримано залежності швидкості нанорідини, концентрацій наночасток, розподіл температур в плівці, а також вирази для чисел Нуссельта, що характеризують інтенсивність тепловіддачі. Автором побудовано графіки вказаних залежностей для різних інтенсивностей термодифузії, коефіцієнтів теплопровідності та густини наночасток, а також концентрації наночасток на границі плівки.

Проведений автором аналіз отриманих результатів показав, що збільшення інтенсивності термодифузії підвищує перенесення наночасток до стінки й збільшує нелінійність розподілу їх концентрації. Зростання теплопровідності та густини наночасток, як і інтенсивності термодифузії веде до інтенсифікації теплообміну.

Четвертий розділ присвячено вивченню нестійкості течії в криволінійних мікроканалах, термокапілярній нестійкості та нодальному мікровузлі.

Характерною особливістю мікромасштабних течії є ефект проковзування рідини на стінці мікроканалу, який може істотно змінити характер течії. Саме це й зумовлює необхідність вивчення цього впливу.

Використовуючи граничну умову проковзування, автором проведено дослідження нестійкості течій Тейлора-Куетта та Діна. Аналітично були отримані незбурені профілі швидкості для кожної течії.

Відцентрова нестійкість досліджена на основі методу малих (лінійних) збурень. Автором отримано серію значень критичних чисел Тейлора та Діна в залежності від ширини каналу та ступеню проковзування та визначено, що із зростанням ступеню проковзування стійкість потоку зростає. Вказаний висновок погоджується з даними літературних джерел.

Дослідження термокапілярної нестійкості у тонкій плівці, що випаровується також виконане методом лінійного збурення. Автором було виведене модифіковане рівняння Орра-Зоммерфельда, що включає вплив поперечної базової швидкості, а також доведено, що теорема Сквайра залишається в силі в застосуванні до поточної ситуації. Відповідно до цієї теореми, для двовимірного плинку двовимірні збурення більш небезпечні ніж тривимірні. Визначено, що збільшення температурної залежності поверхневого натягу призводить до дестабілізації потоку і робить довгохвильові збурення більш небезпечними для стійкості потоку. Для якісної перевірки результатів автором проведено серію чисельних розрахунків термокапілярної плівки, які показали хороше узгодження з аналітичними даними. Чисельні результати для докритичного числа Рейнольдса показують сталий розвиток плівки, а для закритичного – руйнування її структури.

У **п'ятому** розділі розглядаються течії в мікроканалах. Для їх вивчення автор пропонує використовувати сучасний метод ґрат Больцмана. Щоб врахувати вплив ефекту проковзування, автором запропоновано доповнити метод виразами для розрахунку швидкості та температури на стінках мікроканалів в залежності від значення числа Кнудсена, яким визначається інтенсивність проковзування.

Для оцінки адекватності методу ґрат Больцмана з вказаними доповненнями автор проводив порівняння отриманих чисельних результатів з аналітично отриманими профілями. Порівняння показало добре узгодження результатів.

Були розглянуті: початкова ділянка плаского мікроканалу, розгінні течії в мікроканалі з паралельних пластин, в трубі та в мікроканалі з прямокутним поперечним перерізом. Також було проаналізовано стаціонарну течію в криволінійному мікроканалі, що має поперечний переріз. Автором отримані залежності довжин ділянок гідродинамічної та температурної стабілізації, а також гідродинамічного опору від числа Кнудсена.

Для аналізу теплообміну автором побудовано залежності числа Стентона в діапазоні значень числа Кнудсена від 10^{-3} до 10^{-1} .

Вказані результати свідчать, що метод ґрат Больцмана є прийнятним для моделювання теплообміну та гідродинаміки в мікроканалах, для яких використання традиційних методів є неприйнятним.

Шостий розділ дисертації присвячений методам моделювання процесів мезо- та наномасштабного діапазонів. В ньому розглянуто метод молекулярної динаміки та дисипативної динаміки часток.

Методом молекулярної динаміки, що пропонується використовувати для наномасштабних систем, вивчено рух молекул води крізь нанотрубки з атомів вуглецю та кремнію під дією зовнішньої сили, що відповідає перепаду тиску. Проаналізовано можливість запирання руху молекул води шляхом накладання заряду на атоми нанотрубки та визначено значення зарядів, при яких відбувається запирання потоку.

Для вивчення мезомасштабних систем автором запропоновано дворівневу модель, що об'єднує можливості дисипативної динаміки часток та молекулярної динаміки. Модель апробовано автором на вивченні процесів структуроутворення в колоїдних системах. В залежності від вибраних потенціалів взаємодії між частинками колоїду та рідини біли отримані різні типи міцелярних структур. Автором проведено порівняння фото реальної колоїдної системи, отриманого на мікроскопі Zeisse Axio Imager Z1, з конфігурацією подібних частинок, отриманою при чисельному моделюванні. Порівняння показало, що експериментальна й розрахункова структури, що містять добре помітні глобулярні структури колоїдних часток, якісно досить добре корелюють.

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

III. Наукова новизна роботи полягає в тому, що в ній

- вперше розроблено теорію плівкової конденсації нерухої та рухої пари з наночастками та на її основі вивчені закономірності процесів тепломасообміну, гідродинаміки та характер впливу властивостей наночасток на інтенсивність тепловіддачі;
- вперше розроблено теорію плівкового кипіння нанорідини, а також отримано характеристики тепломасообмінних та гідродинамічних процесів, що відображують механізми впливу наночасток на інтенсифікацію теплообміну;
- вперше досліджено вплив проковзування мікропотоків в криволінійних каналах на механізми виникнення центробіжної гідродинамічної нестійкості;
- вперше розвинуто математичний підхід до дослідження термокапілярної нестійкості на основі модифікованого рівняння Орра–Зоммерфельда та доведена теорема Сквайра для цього випадку;
- розвинуто аналітичні та чисельні методи дослідження процесів теплообміну та гідродинаміки в мікроканалах різної конфігурації;

- вдосконалено комбіновану модель дослідження мезомасштабних систем, що поєднує переваги методів молекулярної динаміки та динаміки дисипативних частинок.

IV. Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що

- розроблена теорія плівкової конденсації нерухомої та рухомої пари з наночастками дала можливість вивчити закономірності та характер впливу наночасток на інтенсивність теплообміну плівки конденсату з пласкою пластиною та пласкою поверхнею. Отримані результати дозволяють оптимізувати вибір характеристик та концентрації наночасток при розробці обладнання та оптимізації біотехнологій.
- теорія плівкового кипіння нанорідини дозволила визначити вплив наночасток на теплообмінні характеристики та гідродинаміку процесів кипіння, а також визначити механізми інтенсифікації їх теплообміну. Це дає можливість оптимізувати технологічні процеси загартування та охолодження, в яких використовуються нанорідини.
- досліджені механізми виникнення центробіжної гідродинамічної нестійкості, що виникають при проковзуванні мікропотoku в криволінійних каналах дають можливість визначення режимів мікротечій при проектуванні технологічних процесів та обладнання в біомедичній, харчовій та машинобудівній галузях.
- результати досліджень течій в мікроканалах є корисними при проектуванні мікроелектронних механічних систем різноманітного призначення. Також в деяких макропристроях існують області мікротечій. Як приклад такого обладнання можна навести різноманітні сенсори або мікрофільтри. Вказані результати були отримані при виконанні робіт по гранту НАТО.

V. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів.

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.

VI. Повнота викладення наукових положень та висновків.

Основні положення роботи викладені в 35 друкованих наукових працях. З них 18 статей опубліковано у фахових наукових виданнях. 12 статей опубліковано в журналах, що входять в базу ISI, а до наукометричної бази SCOPUS включено 19 публікацій автора. Результати доповідалися і обговорювалися на 6 міжнародних науково-технічних конференціях.

Автореферат дисертації Тирінова А. І. достатньо повно відображає зміст і суть результатів досліджень, викладених в дисертації.

VII. Оформлення дисертації

Дисертація є закінченою науковою працею, що виконана у вигляді підготовленого 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 доктора технічних наук. Стиль викладення наукового матеріалу забезпечує його чітке та однозначне розуміння.

VIII. Зауваження до дисертації

1. Недостатньо детально розписаний метод ґраток Больцмана для рівняння енергії
2. Обґрунтування граничної умови рівності градієнтів концентрацій нанорідини на стінці потребує більш детального опису.
3. Застосування лінійного наближення при розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при плівковому кипінні нанорідини недостатньо обґрунтоване.
4. Необхідно детально пояснити вибір функцій, що збурюють, при дослідженні нестійкості в мікроканалах.
5. В роботі не описано практичне значення вивчення термокапілярної нестійкості.
6. Необхідність застосування вказаної автором граничної умови проковзування не є обґрунтованою.
7. Недостатньо обґрунтоване використання потенціалу Леннарда-Джонса (6-12), що використовується в наномасштабних взаємодіях, в мезомасштабному моделюванні колоїдних структур.

Зроблені зауваження не зменшують цінності основних наукових положень, висновків і рекомендацій, які виносяться на захист дисертантом. Крім того, вказані недоліки в основному мають характер побажань для подальшої роботи і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Тирінова А.І.

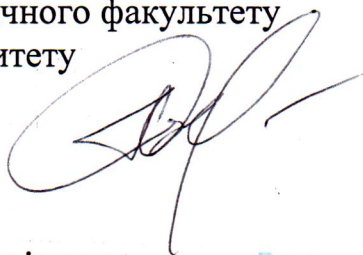
ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Тирінова Андрія Івановича «Тепломасообмін та гідродинаміка теплотехнічних мікро- та наносистем» є завершеною науковою працею, в якій містяться нові наукові результати, спрямовані на вирішення актуальної проблеми підвищення ефективності моделювання тепломасообміну та гідродинаміки в мікро- та наномасштабних системах на основі використання нових вдосконалених розрахункових методів. Робота виконана на сучасному науковому рівні, а одержані результати мають наукову новизну та практичну цінність. Сформульовані в роботі наукові висновки характеризуються високим ступенем обґрунтованості. Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика».

На підставі вищевикладеного, вважаю, що дисертаційна робота «Тепломасообмін та гідродинаміка теплотехнічних мікро- та наносистем» повністю відповідає вимогам пп. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567 (зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2015 р. №656), а її автор, Тирінов Андрій Іванович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06. – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент:

Доктор фізико-математичних наук, професор
кафедри молекулярної фізики фізичного факультету
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка



Гаврюшенко Д.А.

Підпис проф. Гаврюшенка Д.А. засвідчую

