

## ВІДГУК

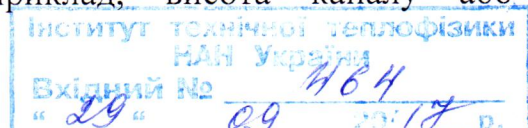
офіційного опонента,  
д.т.н., професора кафедри АЕС і ІТФ КПІ ім. Ігоря Сікорського  
ТУЗА В.О.

на дисертаційну роботу Тирінова Андрія Івановича  
«Тепломасообмін та гідродинаміка теплотехнічних мікро- та наносистем»,  
яку подано на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за  
спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

В дисертаційній роботі пана Тирінова А. І. розглядаються наукова проблема, що пов'язана з дослідженням процесів у мікро- та наномасштабних течіях при використанні аналітичних та чисельних методів моделювання. Мета дослідження пов'язана з мініатюризацією пристроїв. Створення нового обладнання вимагає розуміння процесів, що в ньому відбуваються. Мініатюрні розміри значно ускладнюють, або й взагалі унеможливають експериментальні дослідження. Тому моделювання є чи не єдиним можливим методом їх вивчення. Вирішенню цих проблем присвячена дисертаційна робота пана Тирінова А. І.

### 1. Актуальність обраної теми

Загальною тенденцією розвитку сучасної техніки є зменшення геометричних розмірів і маси чутливих і виконавчих елементів з метою створення теплофізичних мікроприладів підвищеної чутливості, швидкодії та стабільності роботи. Необхідність вивчення процесів теплообміну в них зумовлена тим, що при переході до мікро- і нанорозмірів частіше за все має місце надвисока щільність тепловиділення і виникає необхідність відведення теплоти протягом малих проміжків часу в неоднорідному середовищі: тверде тіло, рідина, газ, вакуум. Для вивчення теплофізичних процесів, які відбуваються, необхідно розуміння структури потоку і його механізму. У звичайних умовах течії рідин і нерозріджених газів досить 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 мікро- і наномасштабних системах є актуальною як в науковому, так і в практичному плані.

## **2. Коротка характеристика змісту роботи**

### **Структура та обсяг роботи**

Дисертація включає вступ, шість розділів, висновки, додатки та список використаних літературних джерел. Загальний обсяг дисертації складає 358 сторінок, з них 297 сторінок основного тексту, 118 рисунків, 11 таблиць, 4 додатки, а список літератури включає 253 найменування на 22 сторінках.

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, 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 *Vuongiorno*. 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 процесу тепломасообміну та гідродинаміки при плівковій конденсації та кипінні нанорідин. Для цього в даній роботі вперше було використано модель *J. Vuongiorno*. Модель адаптовано автором шляхом додавання граничної умови зміни витрати рідини за рахунок фазового переходу.

Аналітично було отримано залежності швидкості нанорідини, концентрацій наночастинок, 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 наночастинок, а також концентрації наночастинок на границі плівки.

Проведений автором аналіз отриманих результатів показав, що збільшення інтенсивності термодифузії підвищує перенесення наночастинок 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 задовільне 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 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. 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 досліджено рух молекул води крізь нанотрубки, які складаються з атомів вуглецю та кремнію, під дією 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 між собою.

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

В цілому дисертаційна робота справляє 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 Тирінова А. І. полягають в наступному.

#### Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше розроблено теорію плівкової конденсації нерухомої та рухомої 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 мікропотoku в криволінійних каналах на механізми виникнення центробіжної гідродинамічної нестійкості;
- вперше розвинуто математичний підхід до дослідження термокапілярної нестійкості на основі модифікованого рівняння орра – зомерфельда 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.

#### Обґрунтованість і достовірність основних положень дисертації.

Основні результати, положення і висновки дисертації базуються на результатах теоретичних досліджень. Дослідження проведені автором ґрунтуються на методах системного аналізу, аналітичних методах розв'язання рівнянь математичної фізики, чисельних методах рішення диференціальних рівнянь,



методі збурень, методах теорії груп Лі, а також методах молекулярної динаміки та динаміки дисипативних частинок. 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 виконана у відділі тепломасообміну та гідродинаміки в елементах теплоенергетичного устаткування Інституту технічної теплофізики НАН України та безпосередньо пов'язана з науковими дослідженнями в рамках держбюджетних тем та міжнародних наукових проектів:

- 1.7.1.862 «Дослідження інтенсифікації тепломасообміну при фазових переходах та дискретно - імпульсному введенні енергії в гетерогенних середовищах методами молекулярного та експериментального моделювання» (2015-2019 рр., № держ. реєстр. 0115U001026).
- 1.7.1.859 «Основи збільшення ефективності водо-водяних ядерних реакторів за рахунок переходу на надкритичні параметри теплоносія» (цільова програма ВФТПЕ НАНУ) (2013-2016 рр., № держ. реєстр. 0113U001166).
- К-1-35 «Експериментальні дослідження ентальпії поперечних перетоків теплоносія в пучках стрижнів активної зони ядерних реакторів для більш надійного визначення запасу до кризи теплообміну» (цільова комплексна програма НАНУ) (2013-2015 рр., № держ. реєстр. 0113U004275).
- 1.7.1.842 «Теплофізичні основи підвищення енергоефективності будівель» (2012-2016 рр., № держ. реєстр. 0112U000296).
- 1.7.1.844 «Дослідження процесів гідродинаміки і тепломасообміну в мікро- та наноструктурованих дисперсних середовищах» (2012-2014 рр., № держ. реєстр. 0112U002532).
- К-1-19/2012 «Дослідження надійності охолодження активної зони ядерного реактору у випадку зупинки циркуляційних насосів».
- 1.7.1.837 «Аеродинамічна та теплова взаємодія будівлі з зовнішнім середовищем».

- Міжнародний грант NATO (COLLABORATIVE LINKAGE GRANT) з університетом Північної Кароліни (США) «MONOLITH FILTERS FOR AIR FILTRATION AND PURIFICATION TO COUNTERACT A POTENTIAL BACTERIOLOGICAL TERRORIST ATTACK».

### **Апробація результатів дисертації**

Результати доповідалися і обговорювалися на шести міжнародних науково-технічних конференціях, зокрема: International Mechanical Engineering Congress & Exposition, November 15-21, 2013, San Diego, CA, USA; 2nd International research and practice conference, NANOTECHNOLOGY and NANOMATERIALS (NANO - 201

### **Публікації**

За результатами дисертаційної роботи опубліковано 37 друкованих наукових праць. З них 12 статей опубліковано в журналах, що входять в базу ISI. Загалом, до наукометричної бази SCOPUS включено 19 публікацій автора.

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 доктора 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. Представлений огляд літератури в недостатній мірі відображає відмінність гідродинамічних та тепломасообмінних процесів у ньютонівських рідинах від процесів у потоках з нанорідинами та течіями в мікроканалах.
2. Не зрозуміло, з яких міркувань наведена статистика публікацій по темі дослідження (рис. 1.2.3).
3. Представлений матеріал у параграфі дисертації 2.1 ґрунтується на відомих положеннях і не зрозуміло, з якою метою проведено аналіз.



4. Потребує пояснення, з якою метою виконано аналіз еквівалентності «гратчастого» рівняння Больцмана і рівняння Нав'є-Стокса?
5. З представлених даних і їх аналізу не зрозуміло фізичні причини зростання інтенсивності тепловіддачі при плівкової конденсації.
6. Нажаль у роботі не в достатньому обсязі проведено верифікацію математичних моделей процесів гідродинаміки і тепломасообміну з нанорідинами. Для цього доцільно було би використати результати експериментальних досліджень інших авторів.
7. При дослідженні процесу плівкового кипіння нанорідини з 10% концентрацією наночастинок не зрозуміло причини зростання у чотири рази інтенсивності тепловіддачі. Доцільно розглянути вплив концентрації наночастинок на інтенсивність теплообміну при кипінні і визначити значення максимальних теплових потоків.
8. Недостатньо обґрунтовано врахування впливу наночастинок при визначенні крайового кута змочування, вираз (3.4.25).
9. Досліджуючи процеси гідродинаміки і тепломасообміну з нанорідинами автор не достатньо приділив увагу особливостям процесу тепловіддачі по довжині мікроканалу, інтенсивність якого носить нелінійний характер, і визначенню довжини початкової ділянки.
10. Дисертантом не наведено обґрунтованих пояснень чому час проходження молекулами води крізь нанотрубку не залежить від матеріалу поверхні.

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, яка виконана на високому науковому рівні, є закінченим науковим дослідженням орієнтованим на вирішення важливої науково-технічної проблеми, що полягає у вирішенні актуальної проблеми 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.

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, 10 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» МОН України щодо докторських дисертацій, а її автор Тирінов Андрій Іванович 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”

В.О.Туза

“ ” вересня 2017 р.

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



А.А.Мельниченко