

## ВІДГУК

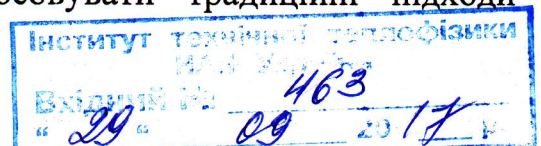
офіційного опонента, доктора технічних наук, старшого наукового співробітника Рохмана Болеслава Борисовича на дисертаційну роботу кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Тирінова Андрія Івановича «Тепломасообмін та гідродинаміка теплотехнічних мікро- та наносистем», представлену на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 - технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

У зв'язку з подальшою мініатюризацією пристроїв і технологій виникає проблема розуміння механізмів тепломасообміну та гідродинаміки в мікро- і наномасштабних пристроях. Дисертаційна робота Тирінова А. І. присвячена питанням, що стосуються вивчення мікро- і наномасштабних течій з використанням аналітичних і чисельних методів моделювання. Створення нового обладнання неможливе без розуміння процесів, які в ньому відбуваються. Але мініатюрні розміри значно ускладнюють або взагалі роблять неможливим експериментальні дослідження. Тому моделювання часто є єдиним можливим способом їх вивчення. Вирішенню цих проблем і присвячена дисертаційна робота Тирінова А. І.

### *Актуальність теми дисертаційної роботи*

Для використання, а тим більше розробки, мікро- і наномасштабного обладнання необхідно добре розуміти механізми процесів, які відбуваються в ньому, і структуру потоку. Однак, малі розміри таких систем надзвичайно ускладнюють експериментальні дослідження їх тепломасообміну і гідродинаміки. Традиційні вимірювальні пристрої вносять сильні збурення, які за масштабами близькі до величин, що вимірюються. Експериментально вдається виміряти тільки інтегральні властивості течії: середні значення температур і швидкостей, витрати рідин, перепади тиску і т.п. Тому важливе місце при вивченні тепломасообміну в мікро- і нанопристрої займає математичне моделювання.

Але в цих умовах течії мають свої особливості. Серйозною проблемою при моделюванні тепломасообміну і гідродинаміки мікро- і наномасштабних пристроїв і технологічних процесів є те, що в цих умовах рідину, що моделюється, вже не завжди можливо розглядати як суцільне середовище. Отже, точність рішень, отриманих з використанням традиційної системи рівнянь Нав'є-Стокса стає недостатньою. Наномасштабні ж течії просто не описуються рівняннями гідродинаміки і тепломасообміну суцільних середовищ і для їх моделювання неможливо застосовувати традиційні підходи і гідродинамічні методи.





Таким чином, створення і адаптація аналітичних і чисельних методів моделювання мікро- та наносистем є актуальним завданням.

### ***Коротка характеристика змісту роботи***

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою. Текст дисертації складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 254 найменувань і додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 308 сторінок машинописного тексту. Робота містить 118 малюнків і 11 таблиць.

Актуальність теми дисертаційної роботи обґрунтована у вступі. Також у вступі визначено її зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульовані мета і основні завдання досліджень, розглянуті об'єкт, предмет і методи досліджень, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, а також наведено дані про апробацію результатів дисертаційної роботи, відомості про особистий внесок здобувача та його публікаціях.

У першому розділі наведено результати аналізу літературних джерел, в яких розглядається сучасний стан моделювання мікро- і наномасштабних потоків. Розглянуто особливості гідродинаміки і тепломасообмінних процесів в таких системах. Автором визначені критерії, які дозволяють поділ і класифікацію розглянутих систем за просторовими і часовим масштабами.

Отримані в результаті проведеного аналізу результати дозволили автору сформулювати тему дисертаційної роботи і завдання досліджень.

Існуючі методи моделювання тепломасообмінних процесів і гідродинаміки в мікро- і наносистемах розглянуті в другому розділі.

Для розрахунку процесів в середовищах, що містять нанорідини, найбільш сучасною та адекватною вважається модель Бонжорно (J. Buongiorno).

Чисельні розрахунки мезо- і мікромасштабних потоків дозволяє здійснювати метод ґрат Больцмана. З огляду на те, що для цих масштабів умова прилипання середовища на стінці не виконується, модель доповнена граничними умовами проковзування на стінках.

В даному методі положення віртуальних частинок передбачається дискретним, то бто частка може займати тільки певні узла заданої решітки. Напрямки руху частинок також передбачаються дискретними. Форма осередків решітки може бути обрана довільно, але для декартових координат найбільш прийнятною є прямокутна форма.

Для розрахунків наномасштабних систем розглянуті метод молекулярної динаміки і динаміка дисипативних частинок.

Метод молекулярної динаміки є одним з найпоширеніших методів комп'ютерного моделювання фізичних процесів на нанорівні. Він заснований на чисельному рішенні класичних рівнянь руху атомів в деякому виділеному



обсязі середовища. Для кожного атома записується рівняння руху у вигляді другого закону Ньютона.

Динаміка дисипативних частинок є стохастичним методом моделювання динамічних і реологічних властивостей простих і складних рідин.

Третій розділ присвячений вивченню тепломасообміну і гідродинаміки при плівковій конденсації і кипінні нанорідин. З цією метою в даній роботі вперше була використана модель J. Buongiorno, модифікована автором шляхом додавання рівняння зміни витрати рідини за рахунок фазового переходу.

Були отримані аналітичні залежності швидкості середовища з наночастинками, концентрації наночастинок, розподілу температур в плівці, а також вирази для чисел Нуссельта, що характеризують інтенсивність тепловіддачі. Отримані залежності дозволили побудувати графіки розподілу зазначених величин для різних інтенсивностей термодифузії, коефіцієнтів теплопровідності і щільності наночастинок, а також концентрації наночастинок на границі плівки.

Проведений аналіз отриманих результатів показав, що зростання інтенсивності термодифузії підвищує перенесення наночастинок до стінки і збільшує нелінійність розподілу їх концентрації. Зростання теплопровідності і щільності наночастинок, а також інтенсивності термодифузії веде до інтенсифікації теплообміну.

З огляду на те, що знання характеру течії також є важливим, четверта глава присвячена вивченню стійкості течій в криволінійних мікроканалах, термокапілярної нестійкості і течій в нодальному мікрвузлі.

Характерною особливістю мікромасштабних течій є ефект проковзування рідини на стінці, який істотно впливає на характер потоку. Використовуючи граничну умову прослизання, автором проведено дослідження нестійкості течій Тейлора-Куетта і Діна. Аналітично були визначені незбурені профілі швидкості для кожної течії. Отримано серії значень критичних чисел Тейлора і Діна в залежності від ширини каналу при різних інтенсивностях проковзування. Висновок, що з ростом ступеня прослизання стійкість потоку зростає добре узгоджується з даними літературних джерел.

При дослідженні термокапілярної нестійкості в тонкій плівці, автором було виведено модифіковане рівняння Орра-Зоммерфельда, що враховує вплив поперечної базової швидкості, а також доведено, що теорема Сквайра залишається в силі в застосуванні до поточної задачі. Визначено, що збільшення температурної залежності поверхневого натягу призводить до дестабілізації потоку і робить довгохвильові збурення більш небезпечними для стійкості потоку. Проведена серія чисельних розрахунків термокапілярної плівки показала гарне узгодження з аналітичними даними. Чисельні результати для докритичного числа Рейнольдса показують сталий розвиток плівки, а для закритичного - руйнування її структури.



Для вивчення перебігу в мікроканалах автор використав сучасний метод ґрат Больцмана, доповнений виразами для розрахунку швидкості і температури на стінках мікроканалів в залежності від значення числа Кнудсена, яким визначається інтенсивність прослизання.

Для оцінки адекватності методу ґрат Больцмана з зазначеними доповненнями проводилося порівняння отриманих чисельних результатів з аналітично отриманими рішеннями. Порівняння показало гарне узгодження результатів.

В діапазоні значень числа Кнудсена від  $10^{-3}$  до  $10^{-1}$  були розглянуті: початкова ділянка плаского мікроканалу, розгінні течії в мікроканалах з паралельних пластин та в трубі і в мікроканалі з прямокутним поперечним перерізом. Також була проаналізована стаціонарна течія в криволінійному мікроканалі прямокутним поперечним перерізом. Автором отримані залежності довжин ділянок гідродинамічної і температурної стабілізації, гідродинамічного опору а також числа Стентона від числа Кнудсена.

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

Для моделювання процесів наномасштабного діапазону розглянуті методи молекулярної динаміки та дисипативної динаміки частинок.

Методом молекулярної динаміки вивчено рух молекул води через нанотрубки під дією зовнішньої сили, що відповідає перепаду тиску. Визначено можливість запирання руху молекул води шляхом накладення заряду на атоми нанотрубки, а також значення зарядів, при яких відбувається запирання потоку.

Для вивчення процесів структуроутворення колоїдів використана дворівнева модель, яка об'єднує можливості дисипативної динаміки частинок і молекулярної динаміки. Залежно від обраних потенціалів взаємодії між частинками колоїду і рідини були отримані різні типи міцелярних структур. Порівняння отриманого на мікроскопі Zeisse Axio Imager Z1 фото реальної колоїдної системи з конфігурацією подібних частинок, отриманої при чисельному моделюванні, показало, що експериментальна і розрахункова структури, які містять добре помітні глобулярні структури, якісно досить добре корелюють.

У висновках наводиться перелік основних наукових і практичних результатів, отриманих в дисертаційній роботі.

### ***Наукова новизна роботи полягає в тому, що в ній***

- вперше розроблена теорія плівкової конденсації нерухомої та рухомої пари з наночастинками і на її основі вивчені закономірності процесів тепломасообміну, гідродинаміки та



характер впливу властивостей наночастинок на інтенсивність тепловіддачі;

- вперше розроблена теорія плівкового кипіння нанорідин, а також отримано характеристики теплообмінних і гідродинамічних процесів, що відображують механізми впливу наночастинок на інтенсифікацію теплообміну;
- вперше досліджено вплив ефекту проковзування в криволінійних мікроканалах на механізми виникнення відцентрової гідродинамічної нестійкості;
- вперше отримав розвиток математичний підхід до дослідження термокапілярної нестійкості на основі модифікованого рівняння Орра - Зомерфельда і доведена теорема Сквайра для цієї задачі;
- отримали розвиток аналітичні і чисельні методи дослідження процесів теплообміну і гідродинаміки в мікроканалах різної конфігурації;
- вдосконалена комбінована модель дослідження колоїдних систем, яка поєднує переваги методів молекулярної динаміки і динаміки дисипативних часток.

*Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що*

- розроблена теорія плівкової конденсації пари з наночастинками дала можливість вивчити закономірності і характер впливу наночастинок на інтенсивність теплообміну плівки конденсату з пласкою поверхнею. Отримані результати дозволяють оптимізувати вибір характеристик і концентрацію наночастинок при розробці обладнання і оптимізації біотехнологій.
- теорія плівкового кипіння нанорідин дозволила визначити вплив наночастинок на теплообмінні властивості і гідродинаміку процесів кипіння, а також визначити механізми інтенсифікації їх теплообміну. Це дає можливість оптимізувати технологічні процеси загартування та охолодження, в яких використовуються нанорідини.
- результати досліджень механізмів виникнення відцентрової гідродинамічної нестійкості мікропотоків з проковзуванням в криволінійних каналах дозволяють визначити режим мікротечії при проектуванні технологічних процесів і обладнання в біомедичній, харчовій та машинобудівній галузях.
- результати досліджень течій в мікроканалах корисні при проектуванні мікроелектронних механічних систем різного



призначення. Також в деяких макропристроях існують області мікротечій. Як приклад такого обладнання можна навести різні сенсори або мікрофільтри. Зазначені результати були отримані при виконанні робіт по гранту НАТО.

### ***Достовірність і обґрунтованість отриманих результатів.***

Достовірність отриманих результатів і висновків підтверджується коректністю постановки задач дослідження, використанням сучасних розрахункових методів і задовільним узгодженням результатів, отриманих здобувачем, з результатами з літературних джерел.

### ***Повнота викладу наукових положень і висновків.***

Основні положення роботи викладені в 35 друкованих наукових працях. З них 15 статей опубліковані у фахових наукових виданнях. 12 статей опубліковано в журналах, що входять в наукометричну базу ISI Web of Science, а в базу SCOPUS включені 19 публікацій автора. Результати доповідалися і обговорювалися на 5 міжнародних науково-технічних конференціях.

Автореферат дисертації Тирінова А. І. досить повно відображає зміст і сутність результатів досліджень, викладених в дисертації.

### ***Оформлення дисертації***

Дисертація є закінченою науковою роботою, виконана у вигляді підготовленого рукопису. Дисертація відповідає вимогам «Постанови КМ від 24.07.2013 №567 пп. 9, 10, 12, 13 » із змінами згідно Постанови КМ №656 від 19.08.2015р, які пред'являють до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Стиль викладення наукового матеріалу забезпечує його чітко й однозначне розуміння.

### ***Зауваження до дисертації***

1. Не вказано походження рівнянь (3.2.4) - (3.2.6), що замикають систему (модель Бонджорно).
2. Звідки взято залежність критичного числа Тейлора від критичного числа Рейнольдса (4.1.28)?
3. Недостатньо описана модель, що використана при чисельних розрахунках термокапілярної плівки.
4. Не описаний перехід від рівняння Больцмана до рівнянь, що описують гідродинаміку.
5. Що таке БГК-апроксимація в методі ґрат Больцмана і чому обрана саме вона?
6. Чому теплообмін в мікроканалах досліджений тільки чисельно?



Зроблені зауваження не зменшують цінності основних наукових результатів, положень, висновків і рекомендацій, які виносяться на захист дисертантом, і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **Висновок**

Дисертаційна робота Тирінова Андрія Івановича «Тепломасообмін та гідродинаміка теплотехнічних мікро- та наносистем» містить нові наукові результати в галузі аналітичного і чисельного дослідження тепломасообміну та гідродинаміки течій з мікро- і наномасштабами. Автором запропонований комплекс методів для вивчення потоків в широкому діапазоні просторових і часових масштабів. Робота виконана на сучасному науковому рівні, а отримані результати мають наукову новизну і практичну цінність. Наукові висновки, сформульовані автором достатньо обґрунтовані.

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

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
Інституту вугільних енерготехнологій  
НАН України

Б. Б. Рохман

Б. Б. Рохман

Підпис доктора технічних наук Рохмана Б. Б. засвідчую:

