

## ВІДГУК

*офіційного опонента, члена-кореспондента ННАН України,  
доктора технічних наук, професора  
заступника директора з наукової роботи  
Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України,  
Костікова Андрія Олеговича*

*на дисертаційну роботу Дмитренко Наталії Павлівни  
«Тепломасообмін та гідродинаміка в мікросистемах з неідеальним  
середовищем та біоконвективними течіями»,  
яку подано на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
зі спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика*

### **Актуальність теми дисертаційної роботи.**

Характерними рисами розвитку багатьох технічних галузей на протязі останніх десятиліть є тенденція поступової мініатюризації відповідних технічних пристроїв, а також застосування технологій, в яких фізичні процеси відбуваються в мікро- та наномасштабах. При цьому така тенденція пов'язана перш за все не з бажанням зменшити масогабаритні характеристики виробів, а з запровадженням нових, більш ефективних технологій, які на цей час вже досягли мікро- та наномасштабів. В багатьох таких технологіях використовуються гідродинамічні та теплофізичні явища на мікро- та нанорівні, нові види робочих тіл (наприклад нанорідини).

Вочевидь, що під час розвитку таких технологій і застосування їх у технічних виробках необхідно знати закономірності протікання відповідних фізичних явищ. При цьому проведення експериментальних досліджень дуже ускладнено, через необхідність мініатюризації вимірювальних сенсорів, а інколи навіть неможливе, адже при переході к мікро- та наномасштабам істотно зростають збурення, які вимірювальній пристрій вносить в систему. Зазвичай всі експериментальні дослідження в системах такого масштабу спрямовані на визначення лише інтегральних характеристик об'єкту. Таким чином інструментарій математичного моделювання та ідентифікації фізичних явищ є невід'ємною складовою як теоретичних досліджень на мікро- та нанорівні, так і засобів, що використовуються під час розробки мікропристроїв і нанотехнологій.

Оскільки при мікро- та наномасштабах довжина вільного пробігу молекул вже сумірна з геометричними розмірами об'єкту, то застосовувати класичні рівняння механіки суцільних середовищ, які описують фізичні явища в континуумі, неможливо. Постає необхідність враховувати міжмолекулярні взаємодії в потоці рідини, взаємодію молекул з твердою поверхнею, тощо. Також при таких масштабах для вже не працює рівняння Клапейрона– Менделєєва, гази необхідно розглядати як реальні з відповідними рівняннями стану. Тому нагальною потребою є розробка нових та вдосконалення існуючих методів аналізу фізичних процесів, які відбуваються в мікро- та наномасштабах.

Виходячи з цього, тему дисертаційної роботи Н. П. Дмитренко, яка присвячена розвитку підходів до чисельного та аналітичного моделювання мікро- та нанопотоків, течії газу Ван дер Ваальса та біоконвективних течій, а також визначенню за допомогою цього математичного інструментарію закономірностей явищ відповідних фізичних явищ, слід вважати актуальною.

## Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, і рекомендацій та їх достовірність

Дисертація є завершеною самостійною науковою працею, загальної обсяг якої складає 377 сторінки, з яких 314 сторінок основного тексту. Робота викладена чітко і є структурованою. Дисертація за складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку з 212 використаних джерел із 352 найменувань і додатків; містить 96 рисунків та 3 таблиці.

У *вступі* обґрунтовано актуальності теми, сформульовано мету та задачі дослідження, приведено наукову новизну та практичне значення, висвітлено апробацію результатів та відображення їх у публікаціях, а також наведено інші формулювання, які необхідні для докторської дисертації.

В *першому* розділі наведені результати аналізу літературних джерел, в яких розглядається сучасний стан моделювання мікро- та наномасштабних потоків. Розглянуто основні аспекти моделювання таких потоків та описані методи, які використовують для моделювання зазначених течій при їх реалізації в теплообмінному обладнанні. Проаналізовано результати досліджень, що стосуються закономірностей, проблемних питань та особливостей процесів з фазовими перетвореннями в нанорідинах та процесів в неідеальних газах Ван дер Ваальса. Описано дослідження в галузі біоконвективних течій і їх вплив на гідродинаміку системи. Опрацьовані матеріали дали змогу здобувачеві сформулювати мету і задачі дисертаційного дослідження.

У *другому* розділі описані методи математичного та чисельного моделювання неідеальних потоків, які використані в дисертаційному дослідженні, а саме, метод кінцевих різниць, метод ґраток Больцмана, базові положення ренормалізаційногрупового методу, метод малих збурень, метод симетрій.

Наведений опис методу ґраток Больцмана (LBM), який успішно використовується для моделювання мікросистем. Відповідно до даного методу положення та напрямки руху часток вважаються дискретними, і визначаються вузлами заданих ґрат. Найчастіше при двовимірному моделюванні використовують ґрати D2Q9 на дев'ять каналів руху, а при тривимірному – D3Q15 на п'ятнадцять каналів. Описано деякі переваги методу LBM, що полягають в простих процедурах, які підходять для паралельних обчислень; легкості і надійності при роботі з багатофазним потоком, складною геометрією. Також наведено опис методу ренормалізаційних груп. Описана процедура перенормування рівнянь, що описують теплообмін та гідродинаміку потоку.

Для математичного дослідження процесів нестійкості ламінарного потоку запропоновано використовувати метод малих збурень, який передбачає розкладання параметрів течії на основні та збурені складові і дозволяє отримати рівняння для амплітуд збурень. Розв'язання такого рівняння методом колокації дає змогу визначити критерій стійкості течій. В дисертації критеріями стійкості, що визначаються, обрано числа Рейнольдса, Тейлора, Діна, Архімеда та Дарсі.

Також в цьому розділі описано розв'язання диференціальних рівнянь теплообміну та гідродинаміки методом груп симетрій (груп Лі). Такий підхід уніфікує і значно розширює різні спеціальні методи інтегрування певних типів рівнянь першого порядку, таких, як однорідні рівняння, рівняння з змінними, що розділяються, рівняння в повних диференціалах і інші.

В *третьому* розділі наведено результати досліджень теплообміну та гідродинаміки течій в мікроканалах.

Моделювання потоку в мікроконфузорі з граничними умовами ковзання другого порядку на основі перетворень симетрії дозволило автору нові аналітичні розв'язки для профілів швидкості та температури, а також для коефіцієнта тертя та числа Нуссельта. Аналітичне дослідження гідродинаміки потоку в мікродифузори показало, що із збільшенням числа Кнудсена ефекти проковзування на стінці мають більший вплив, але при цьому в центральній області потік сповільнюється. Також розрахунок показав, що зміна кута розкриття змінює характер руху мікропотоку.

Наведено чисельно-аналітичний розв'язок задачі теплопередачі в плоскому мікроканалі, що обертається, з граничними умовами ковзання другого порядку. В результаті дослідження виявлено, що збільшення швидкості обертання стінок мікроканалу сприяє зростанню числа Нуссельта. Інтенсифікація процесу теплообміну відбувається до досягнення значення обертального числа Рейнольдса  $Re_{\Omega} \approx 6$ , після чого число Нуссельта помірно зменшується.

Показано вплив параметру коефіцієнту в граничних умовах проковзування другого порядку на теплообмінні характеристики потоку. Наведено результати дослідження потоку в щілевому кроканалі зі змащенням. Отримано вираз для підтримуючої сили з урахуванням ефектів проковзування, та вираз для профілю швидкості.

В *четвертому* розділі викладено результати дослідження теломасообміну та гідродинаміки течій з наночастинками та їх нестійкості.

За допомогою використання модифікованих умов Ренкіна–Гюгоніо отримано аналітичний розв'язок задачі про проходження потоку газу з наночастинками через нормальну ударну хвилю. Виявлено, що асимптота граничного збільшення густини газу зі збільшенням концентрації наночастинок зміщується в область великих значень  $\rho_2/\rho_1$ . Це обумовлено тим, що збільшення концентрації наночастинок збільшує загальну густину нанорідини і тим самим послаблює стрибок тиску в ударній хвилі. Стрибок тиску в нанорідині в ударній хвилі не може бути таким сильним, як у базовій чистій рідині при тих же значеннях  $\rho_2/\rho_1$ .

Досліджено осесиметричну нестійкість потоку між двома концентричними циліндрами (потік Діна), а також відцентрову нестійкість для випадку течії між двома концентричними циліндрами, один з яких обертається (потік Тейлора–Куетта), які проявляються в нанорідинах при їх виготовленні. Розв'язання задачі гідродинамічної стійкості нанопотоку дало змогу визначити вплив деяких параметрів на критерій стійкості нанопотоку.

Виявлено вплив наночастинок на турбулентну в'язкість в потоці за допомогою методу ренормалізаційної групи а саме, розміру часток, які становлять тверду фазу, або полімерних добавок.

В *п'ятому* розділі розглянуто розв'язання задач, що пов'язані з фазовими переходами в нанорідинах.

Розв'язання нестационарної задачі спонтанного переходу до плівкового кипіння на плоскій пластині дозволило отримати аналітичні співвідношення для профілів швидкості, температури, коефіцієнтів тертя та чисел Нуссельта для двох типів граничних та початкових умов (Бромлі та Елліона). Порівняно аналітичні розв'язки для параметрів теплообміну та гідродинаміки парової плівки у вигляді рядів та автотельний розв'язок. Показано, що дані, отримані на основі розв'язання по методу Хевісайда, передбачають швидше встановлення стаціонарного режиму в порівнянні з даними по автотельним розв'язкам.

Аналітично змодельована динаміка зміни в часі параметрів потоку та тепловіддачі нанорідини в умовах не стаціонарності при миттєвому переході до кипіння плівки на вертикальній рівній поверхні. Аналіз розподілу температури показав, що криві, які відповідають паровій плівці з наночастинками, швидко досягають стаціонарного стану. Було виявлено, що збільшення концентрації наночастинок у паровій плівці сприяє посиленню теплопередачі.

Наведено результати експериментального дослідження зміни інтенсивності теплообміну при швидкому охолодженні нагрітого металевго зонда в нанорідинах з різною концентрацією наночастинок, які дали змогу отримати нестаціонарний розподіл коефіцієнта тепловіддачі в нанорідині. Аналітичний аналіз стійкості шару пари при плівковому кипінні нанорідин біля вертикальної гарячої стінки показав, що для значень критичного числа Рейнольдса  $Re_\delta > 7000$  втрата стійкості плівки пари обумовлена не наявністю наночастинок, а швидкістю рідкої фази.

В *шостому* розділі розглянуто задачу вільної конвекції біля нагрітої пластини, яка занурена в газ Ван дер Ваальса. Запропоновано комплекс із трьох методів дослідження зазначеного процесу. Наведено процедуру розв'язання задачі конвективного теплообміну за допомогою методу симетрій, за допомогою спрощеного методу та методу інтегральних співвідношень. На основі запропонованого комплексу отримано співвідношення для розподілу числа Нуссельта, профілю температури та профілю швидкості в пристінному шарі. Визначено вплив параметрів газу Ван дер Ваальса на інтенсивність теплообмінних процесів при вільній конвекції.

З використанням модифікованих умов Ренкіна–Гюгоніо аналітично змодельовані динамічні зміни параметрів потоку газу Ван дер Ваальса, при його проходженні через прямий скачок ущільнення. Проведено наліз впливу коефіцієнтів в рівнянні Ван дер Ваальса на параметри ударної адіабати.

В *сьомому* розділі запропоновано математичну модель, яка є основою розрахунку нестійкості біоконвективних течій в пористих середовищах. Використання зазначеної моделі та методу збурень дало змогу провести досліджені процесів нестійкості біоконвективних течій в пористих середовищах для випадків відсутності та наявності адсорбції. Визначено вплив характеристик пористого середовища на нестійкість біоконвективної течії. Виявлено, що збільшення коефіцієнту дифузії мікроорганізмів зменшує критичне значення проникненості середовища, при якому виникає нестійкість середовища. Також наведено розрахунки впливу товщини шару пористої структури, а також форми макроорганізмів на параметри нестійкості.

*У висновках* сформульовано основні результати дисертаційної роботи.

*В додатках* подано копії актів використання результатів дисертаційної роботи на підприємствах України.

Якщо говорити про *всю роботу в цілому*, то в ній успішно вирішено важливу теоретичну проблему, а саме: розвинено методологію розв'язання задач гідродинаміки і тепломасообміну в мікропотоках, нанорідинах, газах Ван дер Ваальса та біологічних системах. Висновки та рекомендації, які сформульовані в дисертаційній роботі враховують сутність та актуальність наукової проблеми, що вирішується, є значущими для розуміння механізмів переносу маси та тепла в розглянутих об'єктах, удосконалення методів їх аналізу, а також мають практичне значення для запропонування заходів щодо їх керуванням. Все це дає змогу стверджувати, що Дмитренко Н. П., зробила особистий внесок в розвиток теорії

процесів тепломасообміну та гідродинаміки, а результати її роботи мають **світове значення**.

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі є **достовірними та обґрунтованими**, що забезпечується коректним використанням фундаментальних законів гідрогазодинаміки та тепломасообміну, сучасних методів математичного моделювання, загальноприйнятих методик, що базуються на класичних аналітичних та чисельних методах та узгодженням отриманих результатів моделювання з експериментальними даними і з результатами інших авторів.

На підставі аналізу наукових матеріалів роботи можна вважати, що дисертація Дмитренко Н. П. є кваліфікаційною роботою, яка виконана нею особисто і має єдність змісту. За напрямом досліджень та отриманим результатом дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. При ознайомленні з дисертацією опонент не знайшов **ознак академічного плагіату, фабрикації та фальсифікації**.

Зміст автореферату і основні положення дисертації є ідентичними. Результати наукових досліджень кандидатської дисертації Дмитренко Н. П. не виносяться нею на захист докторської дисертації.

#### **Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження.**

Ознайомлення з дисертаційною роботою та авторефератом дає підстави вважати, що отримані дисертантом результати є дійсно новими, а роботу виконано на високому науковому рівні. Наукова новизна одержаних результатів полягає в розвитку аналітичних та чисельних методів дослідження теплофізичних та гідродинамічних характеристик течій з урахуванням мікромасштабних ефектів, геометричних особливостей мікроканалів, умов нестационарності, фазових переходів, закономірностей, які продукують наномасштабні домішки та бактеріальні середовища на процеси нестійкості течій. Також до новизни можна віднести виявлення нових закономірностей фізичних процесів, що розглядаються. Це дає змогу вирішити проблеми інтенсифікації процесів теплообміну, пошуку раціональних конструктивних рішень із забезпеченням оптимальних співвідношень між ефективністю мікропотуку і гідравлічними втратами.

#### **Основні аспекти наукової новизни, які виносяться на захист дисертації:**

1. Аналітичний аналіз на основі методу симетрії основних особливостей теплообміну при стаціонарній течії нестисливого потоку в мікроконфузорі з урахуванням граничних умов ковзання другого порядку дав змогу отримати нові розв'язки для профілів швидкості і температури, а також для коефіцієнта тертя і числа Нуссельта.

2. Вперше використані модифіковані умови Ренкіна–Гюгоніо для аналітичного дослідження потоку газу з наночастинками під час його проходження через нормальну ударну хвилю. Отримано розв'язок для умов Ренкіна–Гюгоніо в потоці газу з різною концентрацією наночастинок.

3. Розвинуто аналітичні та чисельні методи дослідження процесів теплообміну та гідродинаміки в мікроканалах різної геометрії з урахуванням особливостей граничних умов та фізичних властивостей течії. Отримані розв'язки дають змогу дослідити фізичну структуру потоку та вплив явища проковзування.

4. Вперше розширено класичну теорію плівкового кипіння нанорідини на нестационарні процеси, та отримано нестационарні характеристики

тепломасообмінних та гідродинамічних процесів, що відображують механізми впливу наночасток на інтенсифікацію теплообміну.

5. Виконано повний аналіз термогідродинамічної нестійкості шару пари біля вертикальної поверхні на основі підходу Орра–Зоммерфельда, де розглянуто не тільки рівняння збуреної кількості руху, але й збурені рівняння енергії та конвективно-дифузійної концентрації наночастинок.

6. Розвинуто чисельні та аналітичні методи дослідження процесів теплообміну та гідродинаміки а газів Ван дер Ваальса. Отримані розв'язки для профілів швидкості та температури, а також чисел Нуссельта для реальних газів дають можливість оцінити вплив параметрів Ван дер Ваальса на коефіцієнт тепловіддачі.

7. Розвиненою теорію біоконвективної нестійкості з урахуванням властивостей пористого середовища, що відображає механізм бактеріального руху та зростання біоплівки в змодельованій системі.

### **Практичне значення отриманих результатів та рекомендації щодо їх використання**

За допомогою розроблених методів можна визначати параметри та підібрати їх певні діапазони, які забезпечують необхідну інтенсивність тепломасообмінних та газогідродинамічних процесів в пристроях і технологіях різного призначення. Зокрема виявлені механізми виникнення відцентрової гідродинамічної нестійкості Діна та Тейлора дають можливість визначити режим потоку та регулювати його фізичні характеристики при виготовленні нанорідин з заданими властивостями. Результати досліджень течії в мікроканалах можуть бути використані при проектуванні мікроелектронних та мікромеханічних систем різноманітного призначення (мікросенсори, мікрофільтри, мікроударні трубки, тощо). Виявлення впливу наявності наночасток на теплообмінні характеристики та гідродинаміку процесів кипіння дає можливість оптимізувати за часом технологічні процеси загартування та охолодження, в яких використовуються нанорідини.

Результати дисертаційного дослідження використовуються на вітчизняних підприємствах. Зокрема в «Тотал Флюїд менеджмент» сформовано рекомендації щодо здійснення регулярного контролю подальшого виробничо-технологічного використання гартувальних середовищ. За допомогою розроблених методів моделювання проведено оптимізація конструктивних рішень під час розробки сенсорів тиску в ДП СКТБ з ДВ Інституту фізики напівпровідників ім. Лашкарьова.

### **Повнота опублікування основних положень дисертації**

Основні положення та результати роботи опубліковано у 36 наукових працях, серед яких 2 колективні монографії, 18 публікацій у виданнях що входять до міжнародних науко-метричних баз даних Scopus та/або Web of Science, 12 статей у періодичних фахових спеціалізованих виданнях, 4 тези та доповіді на міжнародних наукових конференціях. Це дає підставу відзначити відповідність дисертаційної роботи Дмитренко Н. П. сучасним вітчизняним вимогам щодо кількості і рівня публікацій результатів наукових досліджень стосовно докторських дисертацій.

### Недоліки та зауваження

Слід відзначити такі зауваження:

1. В другому розділі наведено опис методів, які застосовуються для розв'язання задач гідродинаміки та тепло масообміну. Крім цього тут доцільно було б навести порівняльний аналіз цих методів і дати рекомендації для яких типів задач краще використовувати одні методи, а для яких інші. Наприклад, незрозуміло, чому автор використовує саме метод ґраток Больцмана для розв'язання задач, пов'язаних з моделюванням мікротечій.

2. Під час розв'язання задач, що пов'язані з дослідженням нестійкості течії або кипіння нанорідин, біоконвективних течій, використовувався метод колокації. При цьому бажано б було пояснити особливості використання методу колокацій для таких задач нестійкості.

3. Не зрозуміло, на основі чого були обрані два значення 0,5 та  $-1,6875$  для коефіцієнту  $A_2$  в умовах проковзування (3.1.1) під час моделювання течії в мікродифузори та мікроконфузори.

4. Під час моделювання течії в мікродифузори автором було досліджено вплив куту розкриття мікродифузори та характер течії. Проте при розгляданні течії в мікроконфузори цього не було зроблено. Добре відомо, що при великих кутах звуження в звичайних конфузорах виникають застійні зони з вихровими течіями. Бажано б було дослідити, чи відбувається подібне явище в мікроконфузорах.

5. В дисертації досліджено різноманітні фізичні процеси, що відбуваються в мікропотоках і нанорідинах. Проте бажано б було більше уваги приділити прикладним аспектам використання цих явищ. Наприклад пояснити, яким чином на практиці використовують ефекти ударних хвиль в газах з наночастинками, в яких випадках окрім процесів ґартування можливо спостерігати явище миттєвого переходу до плівкового кипіння, тощо.

6. На рис 5.2.10 наведено порівняння експериментальних і розрахункових значень коефіцієнту тепловіддачі при різних концентраціях поліакриламід у водяному розчині. На експериментальних кривих 1, 2, 3 видні чітко виражені точки перегину, які не спостерігаються на відповідних розрахункових кривих. Через це при екстраполяції кривих 1, 2, 3 в область менших значень часу можна очікувати істотне розходження експериментальних і розрахункових даних. Бажано пояснити цей ефект.

7. При розгляданні біоконвективних течій в пористому середовищі в моделі присутні параметри, які визначають розміри мікроорганізмів. Проте не вказано як цей розмір співвідноситься з розміром пор, і чи впливає розмір пор на процес, що досліджується.

8. Зауваження щодо оформлення роботи. В тексті дисертації та автореферату присутні незначні граматичні помилки та описки. Подекуди зустрічаються неточності в посиланні, наприклад на сторінці 185 вказано «рівняння (4.2.)», в той час, коли автор використовує трьохрівневу нумерацію формул. Також зустрічається невірне використання термінології. Наприклад, автор вживає терміни «метод кінцевих різниць» замість «метод скінчених різниць»; «рішення» замість «розв'язок» (коли мова йде про математичний результат) та «розв'язання» (коли мова йде про процес розв'язання математичної задачі), «вирішення рівнянь» замість «розв'язання рівнянь» і т. і.

### Загальні висновки

Подана до захисту дисертація Дмитренко Наталії Павлівни на тему «Тепломасообмін та гідродинаміка в мікросистемах з неідеальним середовищем та біоконвективними течіями» за своєю актуальністю, постановками завдань, методами їх вирішення та отриманими результатами є закінченим науковим дослідженням, яке виконано у відповідності з науковими програмами і планами Інституту технічної теплофізики НАН України.

Зроблені зауваження не знижують загальну позитивну оцінку роботи. Здобувачем отримано нові, науково обґрунтовані результати, які вирішують важливу наукову проблему розвитку методології розв'язання задач гідродинаміки і тепломасообміну в мікропотоках, нанорідинах, газах Ван дер Ваальса та біологічних системах. Створені автором методи та алгоритми дозволяють ефективно знаходити параметри течії та розробляти підходи до забезпечення необхідної інтенсивності тепломасообмінних та газогідродинамічних процесів. Це дає змогу розробляти пристрої і технології в яких використовуються вищезначені фізичні явища.

Основні положення дисертаційної роботи в достатній мірі висвітлено в опублікованих працях та апробовано на наукових конференціях. Зміст автореферату повністю відповідає основним положенням дисертації. Оформлення дисертації та автореферату відповідає сучасним вимогам до наукових текстів.

На підставі викладеного вважаю, що за актуальністю теми, ступенем обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, достовірністю, новизною, теоретичною та практичною цінністю одержаних результатів дисертаційна робота «Тепломасообмін та гідродинаміка в мікросистемах з неідеальним середовищем та біоконвективними течіями» повністю відповідає вимогам пп. 7, 8, 9, «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197 (зі змінами, внесеними згідно з Постановою Кабінету Міністрів України від № 502 від 19.05.2023) та паспорту спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика, а її автор, Дмитренко Наталія Павлівна, заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за зазначеною спеціальністю.

Член-кореспондент НАН України,  
доктор технічних наук, професор,  
лауреат Державної премії України  
в галузі науки і техніки  
заступник директора з наукової роботи  
Інституту проблем машинобудування  
ім. А. М. Підгорного  
НАН України



А. О. Костіков