

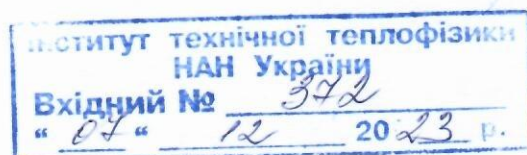
ВІДГУК

офіційного опонента, доктора фізико-математичних наук, професора Гаврюшенка Дмитра Анатолійовича на дисертаційну роботу кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Дмитренко Наталії Павлівни «**Тепломасообмін та гідродинаміка в мікросистемах з неідеальним середовищем та біоконвективними течіями**», представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

У дисертаційній роботі Дмитренко Н.П. розглядаються питання, що стосуються аналітичного та математичного дослідження процесів тепломасообміну та гідродинаміки, які мають місце при реалізації мікро- та наномасштабних течій, газів ван дер Ваальса та течій біоконвекції. Проблема моделювання зазначених процесів виникає у зв'язку з мініатюризацією теплообмінних пристроїв та розвитком біотехнологій. Створення нового теплообмінного обладнання, використання нових типів теплоносіїв вимагає розуміння процесів, що в них протікають. Але часто мініатюрні розміри систем значно ускладнюють, або й взагалі унеможливають експериментальні дослідження. Аналітичне та математичне моделювання процесів тепломасообміну та гідродинаміки на мікро-, нанорівні є загальнодоступним, а інколи і єдиним можливим способом їх вивчення. Отже, метою дисертаційної роботи Дмитренко Н.П. є розвиток теорії тепломасообміну та гідродинаміки в мікроканалах, у нанорідинах, у реальних газах (газ Ван дер Ваальса) та біологічних системах на основі аналітичних та чисельних методів.

1. Актуальність теми дослідження

В останні роки дослідження теплофізичних процесів, що протікають на мікромасштабних рівнях у нано- та біосередовищах, стають все більш актуальними. Це пов'язано зі зменшенням габаритно - масових характеристик електронних пристроїв, а також із унікальними характеристиками, властивими фізичним явищам на мікро- та наномасштабах. Важливим завданням при створенні сучасних технологій є інтенсифікація процесів теплообміну. Одним з перспективних способів інтенсифікації є використання мікро- та нанотехнологій, що дозволяє збільшити характеристики теплообміну в кілька разів. Мікро-, нано- та біотехнології відіграють важливу роль у життєдіяльності людини. Останнім часом інтерес до вивчення даних явищ набув особливої актуальності через швидкий розвиток низки областей, пов'язаних, перш за все, з хімічними та біохімічними процесами, в яких масоперенесення в потоці є одним із ключових явищ. Пошук шляхів підвищення ефективності процесу тепломасопереносу та оптимізації його фізико-механічних характеристик потребує як експериментальних методів



дослідження, так і комплексного аналітичного та чисельного моделювання тепломасообміну та гідродинаміки в мікроканалах, нанорідинах, газах Ван дер Ваальса та біологічних середовищах, який у своїй дисертаційній роботі провела здобувачка. Теоретичні дослідження є вельми актуальними, оскільки розвинуті методи дослідження тепло-масообміну та гідродинаміки враховують геометричні ефекти, проковзування, нестационарність процесів, різноманітні граничні та початкові умови, режим течії, вплив великої кількості фізичних чинників.

2. Коротка характеристика змісту роботи

Дисертація має структуру завершеної науково-дослідної роботи. Текст дисертації складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 352 найменувань та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 377 сторінок машинописного тексту. Робота містить 105 рисунків та 3 таблиці.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, обґрунтовано наукову новизну, теоретичну і практичну цінність одержаних результатів, визначено особистий внесок здобувача. Наведено інформацію щодо апробації, структури і обсягу дисертації.

У *першому розділі* наведено результати аналізу літературних джерел щодо перспектив і особливостей реалізації мікроканальних систем в теплообмінному обладнанні. Проведений літературний огляд досліджень задач фазових переходів в нанорідинах дав змогу визначити актуальні проблеми при дослідженні зазначених процесів. Описаний сучасний стан використання реальних газів та показано їх ефективність порівняно з ідеальними газами в якості робочих тіл теплообмінного обладнання. Розглянутий сучасний стан моделювання мікро- та наномасштабних потоків. Також визначено основні особливості та закономірності біоконвективних течій в пористих структурах.

За результатами проведеного аналізу літературних джерел сформульована мета дисертації і задачі досліджень.

У *другому розділі* наведені методи математичного та аналітичного моделювання, які використані в дисертаційній роботі для дослідження процесів тепломасообміну та гідродинаміки в мікро-, нано- та біопотоках.

Система рівнянь Нав'є–Стокса є основною для описування течій в гідродинаміці. Дана система застосовується в широкому спектрі задач.

Метод кінцевих різниць є частовживаним та відносно простим математичним інструментом для розв'язку задач гідродинаміки та теплообміну.

Детально описано метод ґраток Больцмана (LBM). Однією з його сильних сторін є можливість вибору оператора зіткнень, який враховує особливості мікродинаміки середовища. Таким чином, для LBM можливо моделювати явища, які практично є нерозв'язними для традиційних методів, спрямованих на моделювання мікроскопічних властивостей флюїду.

Описані базові положення Ренормалізаційно-групового методу. Показано процедуру переведення в хвильовий простір основних параметрів диференційних рівнянь, що становить модель турбулентності.

Одним з методів вивчення процесів нестійкості ламінарного потоку є метод малих збурень. В основі методу збурень є розкладання параметрів потоку на основний та збурений, який є накладеним на основний.

У результаті математичних перетворень отримується диференційне рівняння четвертого порядку відносно амплітуд збурень. Дане диференційне рівняння досліджується на власні значення. В результаті отримується критерій стійкості потоку.

Третій розділ присвячений вивченню теплообміну та гідродинаміки в мікроканалах різної геометрії. Основною особливістю потоків у мікроканалах є невиконання умови, коли швидкість потоку на стінці рівна нулю, тобто наявність явища проковзування на стінці.

Наведений аналітичний розв'язок задачі теплообміну в мікроконфузорі з урахуванням граничних умов проковзування другого порядку. Розв'язок здійснений методом симетрій груп Лі. В результаті отримані вирази для розподілу швидкості коефіцієнта тертя, температури та числа Нуссельта. Виявлено, що умови проковзування сприяють зменшенню термічної взаємодії потоку зі стінкою каналу і в результаті теплообмін в мікроканалі погіршується.

Також аналітично змодельована течія в мікродифузорі при низьких числах Рейнольдса. Розрахунок дав змогу оцінити вплив кута розкриття мікродифузору на динаміку розвитку потоку. Результати розрахунків показали, що при великому куті розкриття в пристінковій області з'являються області зворотних течій, які підсилюються ефектами проковзування.

Також змодельований процес теплообміну в плоскому обертальному мікроканалі. Задача вирішувалася аналітично та математично за допомогою методу ґраток Больцмана. Також при вирішенні поставленої задачі враховувалися граничні умови проковзування другого порядку. В результаті на основі отриманих даних були побудовані профілі швидкості, температури, числа Прандтля, та числа Нуссельта в залежності від величини ефектів проковзування та ефектів обертання стінок мікроканалу.

Четвертим геометричним типом мікроканалу, який розглядався, є потік у мікрощілині. Розглядалася плоска течія в'язкої рідини у вузькій щілині, нижня стінка якої рухається з постійною швидкістю у напрямку від широкої частини щілини до вузької. Кут розкриття щілини вважається малим.

Результати розрахунку показали, що зі зростанням інтенсивності проковзування (збільшення значення числа Кнудсена) зміна тиску слабшає. В результаті зменшується гідравлічний опір. Оскільки течія в мікрощілині має як дифузорний, і конфузорний характер, то ефекти проковзування по-різному впливають на профіль швидкості. Виявлено, що біля нерухомої стінки спостерігається утворення зони зворотних течій.

У четвертому розділі розглядаються питання гідродинамічної нестійкості Діна та Тейлора нанорідин в криволінійному каналі з різною температурою на стінках.

Криволінійний канал розглядається як зазор між двома циліндрами. Рух нанорідини обумовленими азимутальним градієнтом тиску. В результаті застосування методу збурень отримані вирази, які досліджуються на власті значення в результаті тримані залежності для критичних чисел Діна та Тейлора. Зазначені критерії залежать від комплексу безрозмірних параметрів, а саме від комплексу, що описує відносну густину наночастинок (M), температурну неоднорідність, число Прандтля та Шмідта та величини зазору криволінійного каналу.

Використовуючи метод ренормалізаційної групи досліджено вплив наночастинок на параметри турбулентного потоку. В ході процедури перенормування отриманий вираз для перенормованої турбулентної в'язкості. Він показує, що присутність другої фази (тверді частинки) призводить до зменшення вихрової в'язкості.

П'ятий розділ присвячений дослідженням фазових переходів у нанорідинах.

Спочатку розглядається задача пов'язана з вивченням динаміки процесу тепловіддачі при спонтанному переході до плівкового кипіння. Вперше дана задача розглядається з урахуванням умов нестационарності. Задача вирішувалася двома методами, а саме, методом Хевісайда на основі перетворення Лапласа та технікою симетрії (групи Лі).

Проблема вирішена за таких припущень: силами інерції в паровій плівці можна знехтувати порівняно із силами в'язкості та плавучості; переносом тепла і маси в паровій плівці в напрямку потоку (тобто вздовж x - координати) можна нехтувати порівняно з тепло- і масообміном у стінці-ортогональному напрямку (тобто вздовж y - координати); ефекти поверхневого натягу на межі розділу пара-рідина незначні. Основна система диференціальних рівнянь вирішувалася за допомогою двох наборів граничних умов. У першому випадку локальні швидкості пари та рідини на межі розподілу збігаються. Це означає відсутність механічної взаємодії та зсувних напружень на межі розділу пара-рідина, як зазначив Бромлі. У другому випадку застосовані початкові та граничні умови, запропоновані Еліоном для нерухомої рідини на межі пара-рідина.

У результаті отримані нестационарні температурні профілі в паровій плівці, вираз для числа Нуссельта, рішення для профілю швидкості та коефіцієнту тертя. На основі отриманих виразів побудовані графічні розподіли параметрів теплообміну та гідродинаміки.

Далі розглядається аналогічна задача нестационарної теплопередачі та динаміки потоку нанорідини під час миттєвого переходу до плівкового кипіння. Дана задача є аналогічною попередній тільки розрахункова система теплообміну та гідродинаміки при спонтанному переході до плівкового кипіння доповнюється рівнянням, що враховує концентрацію твердих нанодомішок. Розглядається нанорідина з нанодомішками оксиду алюмінію

концентрацією 5%. Задача вирішувалася аналогічно попередній з двома граничними умовами, а саме, Бромлі та Еліона. Розрахункові методи також ті самі. У результаті математичних перетворень отримані вирази для нестационарного розподілу теплофізичних та гідродинамічних параметрів в паровій плівці з наночастинками. Математичне моделювання процесу спонтанного переходу до плівкового кипіння в нанорідині доповнені експериментальним дослідженням процесу різкого закипання нанорідини з метою розглянути динаміку зміни в часі коефіцієнта тепловіддачі на поверхні циліндричного металевого зонда, нагрітого до температури $T = 810 \text{ }^\circ\text{C}$ і зануреного у водно-полімерну охолоджуючу рідину.

Отримані експериментальні дані, що представлені якісно узгоджуються з прогнозами, отриманими з використанням теоретичної моделі.

Також у п'ятому розділі розглянута на задача нестійкості парової плівки пари біля вертикальної плоскої пластини, температура якої T_w постійна при кипінні нанорідини. Дослідження проводилося з використанням методу збурень. Дослідження рівняння для амплітуд збурень на власні значення дало змогу знайти вираз для збуреного профілю швидкості парової плівки, збуреного профілю швидкості, збурені профілі температури і концентрації наночастинок. В результаті розрахунки, показали, що критичне значення числа Архімеда для нерухомої нанорідини $Ar_{cr}=92357$. Побудована залежність числа Архімеда від числа Рейнольдса, аналіз якої дав змогу визначити область чисел Рейнольдса парової плівки, в області яких наночастинок викликають дестабілізуючий ефект на парову плівку.

У шостому розділі розглядаються задачі теплообміну та гідродинаміки в газах Ван дер Ваальса.

Спочатку розглядається задача проходження газу Ван дер Ваальса через ударну хвилю. Процес проходження газу Ван дер Ваальса через пряму ударну хвилю описувався системою рівнянь Ренкіна-Гюгоніо. Також основна система рівнянь доповнювалася рівнянням стану газу Ван дер Ваальса. В ході математичних перетворень отримана залежність асимптоти густини від параметру додаткового об'єму для різного коефіцієнта стиснення. Визначений вплив різних значень параметрів B та A на стрибок тиску в ударній хвилі. Визначено зв'язок між швидкостями потоку до стрибка і після. Визначена залежність коефіцієнта швидкості до ударної хвилі та після для різних коефіцієнтів Ван дер Ваальса. Отриманий вираз для числа Маха в залежності від параметрів Ван дер Ваальса.

Проведене дослідження природної конвекції газу Ван дер Ваальса над вертикальною пластиною методом симетрії. А саме, досліджений вплив зміни стану газу Ван дер Ваальса на характеристики природної конвекції і порівняно з випадком ідеального газу (рівняння Клайперона).

Використання методу симетрії дало змогу отримати систему звичайних диференціальних рівнянь. Визначений вплив параметрів Ван дер Ваальса на профілі температури та вплив параметрів Ван дер Ваальса на відносні числа Нуссельта (відносні коефіцієнти тепловіддачі).

Також задача про теплообмін при вільній конвекції над вертикальною пластиною досліджена спрощеним аналітичним методом. Особлива увага була приділена інтерпретації впливу параметрів моделі Ван дер Ваальса на структуру потоку рідини та теплообміну через зміну густини газу Ван дер Ваальса порівняно з моделлю ідеального газу. Задавалося спрощене рівняння температури в рухомому шарі газу.

Третій метод, яким досліджувалася природна конвекція газу Ван дер Ваальса над вертикальною пластиною є інтегральний метод.

Виведені інтегральні рівняння потоку газу Ван дер Ваальса. Математичні перетворення дали змогу отримати вираз для відносного коефіцієнта тепловіддачі, аналогічний як і для спрощеного аналітичного методу.

У сьомому розділі проведені дослідження, пов'язані з ефектами нестійкості біоконвекції в пористих середовищах.

Запропонована математична модель біоконвекції в пористих середовищах. Особливістю біоконвекції в пористих середовищах є те, що мікроорганізми можуть адсорбуватися пористим середовищем, а також «відриватися» від пористої матриці і повертатися назад в потік. Накопичення мікроорганізмів в пористому середовищі веде до зменшення його проникненості. Це в свою чергу впливає на властивість мікроорганізмів проникати через мікроканали.

Використовуючи запропоновану математичну модель досліджені особливості нестійкості біоконвекції при відсутності адсорбції. Отримана умова виникнення нестійкості безрозмірній формі.

Також досліджувалася задача нестійкості біоконвекції при наявності адсорбції. Отриманий вираз для критичного значення проникливості пористого середовища в залежності від коефіцієнтів адсорбції і десорбції. Також отриманий вираз для визначення критичного значення початкової пористості.

Розглянута задача нестійкості біоконвекції в пористому шарі кінцевої висоти та вплив на даний процес форми мікроорганізму

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

У додатках наведені акти використання результатів дисертаційних розрахунків.

3. Наукова новизна отриманих результатів

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 рішення 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 рішення 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 математичні рішення 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 наночастинок на інтенсифікацію теплообміну.

5. Виконано повний аналіз термогідродинамічної нестійкості шару пари біля вертикальної поверхні на основі підходу Орра Зоммерфельда, де розглянене 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 газах Ван дер Ваальса. Отримані рішення 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.

4. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів

Базується на послідовному дотриманні визначеної методології, чіткій аргументованості та науковому формулюванні мети і завдань дослідження, його об'єкта та предмета. Окреслена мета – розвинути теорію тепломасообміну та гідродинаміки в мікроканалах, в нанорідинах, в реальних газах (газ Ван дер Ваальса) та біологічних системах на основі аналітичних та чисельних методів. У роботі опрацьовано широку джерельну базу. Дана робота істотно відрізняється поглибленим вивченням досліджень, які стосуються тематики дисертації, що дало змогу сформулювати наукову новизну. Завдяки цьому висновки дослідження виглядають аргументовано та переконливо.

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.

Детальне ознайомлення з текстом дисертації дає підстави стверджувати, що підхід дисертанта до вивчення проблем тепломасообміну та гідродинаміки в мікропотоках, нанопотоках, газах Ван дер ваальса та біоконвективних течіях відзначається фундаментальністю та багатогранністю.

5. Апробація результатів та повнота викладення в опублікованих працях

Основні наукові положення та висновки висвітлені в 36 публікаціях, з яких 12 – статті в наукових фахових виданнях України та 2 публікації – колективні монографії, 18 публікацій в виданнях, що індексуються наукометричними базами даних Scopus та Web of Science. До опублікованих праць, які додатково відображають наукові результати дисертації та є свідченням апробації роботи, відносяться тези 4 доповідей на міжнародних наукових конференціях. Усі основні результати дисертаційної роботи є новими та вчасно опубліковані у наукових виданнях.

6. Оформлення дисертації

Дисертація є закінченою науковою працею, що виконана у вигляді підготовленого рукопису. Дисертація відповідає вимогам що їх пред'являють до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Стиль викладення наукового матеріалу забезпечує його чітко та однозначно розуміння.

7. Зауваження до дисертації.

Віддаючи належне позитивним здобуткам і висновкам дисертаційної роботи Дмитренко Н.П., вважаю за необхідне звернути увагу на питання, які потребують певних уточнень, роз'яснень та дискусії.

1. При використанні методу ґраток Больцмана не описаний перехід від рівняння Больцмана до рівнянь гідродинаміки та теплообміну.
2. При дослідженні впливу наночастинок (п. 4.4) на параметр турбулентності методом ренормалізаційних груп не пояснено, чому береться універсальний проміжок спектра турбулентної енергії. Також потрібно пояснити, як бралась до уваги випадкова сила в ренормгруповому перетворенні, оскільки вона є в рівнянні, що описує динаміку руху течії.
3. В ході математичного розв'язання задач нестійкості Діна та Тейлора потоку з наночастинками отримані дані, що свідчать про дестабілізацію потоку в результаті зменшення комплексного параметру, що враховує густину нанопотоку. Потрібно пояснити фізичну сторону даного процесу.
4. Відсутнє обґрунтування застосування наближення лінійної термодинаміки – наприклад, закону Фур'є (стор. 128 і далі).
5. Не обґрунтовано застосування термічного рівняння стану саме ван дер Ваальса для опису поведінки реальних газів.
6. У дисертації наявні деякі похибки редакційного та стилістичного характеру, наприклад «критерій Кундсена» (стор.125) тощо. Як побажання до оформлення варто зазначити, що представлені дані значно виграли б у випадку презентації даних на кольорових графіках (див., наприклад, рис. 5.2.8)

Зроблені зауваження не зменшують цінності основних наукових положень, висновків і рекомендацій, які виносяться на захист дисертантом. Крім того, вказані недоліки в основному мають дискусійний характер і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Дмитренко Н.П.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Дмитренко Наталії Павлівни «**Тепломасообмін та гідродинаміка в мікросистемах з неідеальним середовищем та біоконвективними течіями**» є завершеною науковою працею, в якій містяться нові наукові результати, спрямовані на вирішення актуальної проблеми, а саме розвитку теоретичних методів дослідження тепломасообміну та гідродинаміки в мікро- та наномасштабних системах на основі врахування нових фізичних ефектів, що мають місце на мікро- та нано масштабному рівні. 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 в мікросистемах з неідеальним середовищем та біоконвективними течіями» повністю відповідає всім вимогам п. 7 та п. 9 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. №1197 (зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від № 502 від 19.05.2023) щодо докторських дисертацій, а її автор, Дмитренко Наталія Павлівна, 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,
завідувач кафедри молекулярної фізики
фізичного факультету
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка



Дмитро ГАВРЮШЕНКО

Ліценсія видадена
Україна
06.14.2023р.

