

ВІДГУК

на дисертаційну роботу 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

Актуальність теми

Сучасний розвиток електроніки приводить до мініатюризації приладів, що в свою чергу, збільшує питому величину тепловиділення. Забезпечення температурного режиму елементів обладнання потребує застосування ефективних систем охолодження. За останні декілька десятиліть спостерігається значне зменшення геометричних розмірів чутливих і виконавчих елементів з метою створення приладів з раніше недосяжними характеристиками щодо чутливості, швидкодії та стабільності роботи. Перевага мікроканалів пояснюється їх високим значенням відношення площі поверхні до об'єму і їх невеликим об'ємом. Вивчення процесів теплообміну та гідродинаміки в мікроканалах обумовлена широким застосуванням мікроприладів в медицині, фармакології, біології, теплоенергетиці, приладобудуванні, хімічній промисловості.

Науковий інтерес до дослідження гідродинаміки і теплообміну рідин з наночастинками та у біологічних потоках є актуальним, адже це є одним з перспективних методів інтенсифікації процесів. Течії з наночастинками зараз активно досліджуються в якості нових типів теплоносіїв теплообмінного обладнання, оскільки нанорідини здатні підвищити критичний тепловий потік в порівнянні з чистим теплоносіями. Вони мають високу колоїдну стійкість і стабільність до багаторазових циклів кипіння-охолодження, відносно низьку вартість, доступними та екологічно безпечними.

Розвиток медичної, фармакологічної та харчової галузей безпосередньо пов'язаний з дослідженнями бактерій та їх впливом на організм людини. Методи вирощування біологічних колоній та їх вплив на фізичні та

гідродинамічні характеристики рідкого середовища є актуальною і цікавою науковою задачею.

Потрібно зазначити, що експериментальні дослідження тепломасообміну в мікро- і наносистемах, зазвичай, ускладнюються їх надзвичайно малими розмірами. Традиційні вимірювальні пристрої доволі дорогі, окрім того вони вносять сильні збурення, порівнянні з вимірюваними величинами. Експериментально можливо виміряти лише інтегральні властивості течії: середні значення температур, витрату рідини при заданому градієнті тиску, профіль швидкості, падіння тиску і т. п. Теплообмін та гідродинаміка нанорідин, мікротечії та біопотоків відрізняється від макроскопічних потоків. Для того щоб розуміти процеси, які відбуваються у мікро- та наномасштабах, необхідне розуміння структури потоку. І як наслідок, важливе місце при дослідженні гідродинаміки і тепломасообміну у мікро-, нано-, біотечіях відіграє аналітичне та математичне моделювання.

Актуальність даної дисертаційної роботи полягає у розвитку методів аналітичного моделювання процесів тепломасообміну та гідродинаміки в мікро-, нано-, та біопотоках та реальних робочих тілах.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність

Аналіз поданої до захисту дисертації та публікацій дисертанта дозволяє дійти висновку, що наукова обґрунтованість і достовірність викладених у них результатів забезпечується використанням загальноприйнятих розрахункових методик, що базуються на класичних аналітичних та чисельних підходах, чітким визначенням об'єкту та предмету дослідження, мети і завдань дисертаційної роботи, системним дослідженням та узагальненням результатів наукових розробок вітчизняних та зарубіжних фахівців з тепломасообміну та гідродинаміки на мікрорівні. Також проведена верифікація отриманих в роботі результатів на відповідність класичним теплофізичним і гідродинамічним процесам, а також з результатами сторонніх авторів.

Наукові положення дисертаційної роботи є достатньо обґрунтованими. Сформульовані висновки є конкретними та стосуються важливих аспектів тепломасообміну та гідродинаміки в мікро-, нано-, та біосистемах і в газах Ван дер Ваальса.

Наукові результати та положення дисертаційної роботи знайшли практичне використання, про що свідчать акти використання результатів дисертаційної роботи.

Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації

Наукові положення, висновки, які характеризуються науковою новизною, сформульовані автором самостійно. Вони відображають її науковий внесок у розв'язання комплексу задач що пов'язані з тепломасообмінними та гідродинамічними процесами на мікрорівні. Аналіз змісту дисертаційної роботи Дмитренко Н.П. дає підстави стверджувати, що сформульована автором мета дослідження досягнута, завдяки вирішенню поставлених задач. Результати аналітичних, чисельних та експериментальних досліджень характеризуються науковою новизною та мають достатню ступінь апробації.

Серед найбільш вагомих наукових результатів дисертаційного дослідження, які вперше досягнуті, слід відзначити:

1. 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.

2. Отримали подальший розвиток аналітичні та чисельні методи дослідження процесів теплообміну та гідродинаміки в мікроканалах різної геометрії з урахуванням особливостей граничних умов та фізичних властивостей течії. Виведені нові математичні рішення дають змогу дослідити фізичну структуру мікропотоку та вплив явища проковзування на інтенсивність теплообмінних процесів.

3. 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.

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

5. Вперше розвинена теорія біоконвективної нестійкості з урахуванням властивостей пористого середовища та форми мікроорганізмів, що відображає механізм бактеріального руху та зростання біоплівки в змодельованій системі.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Описані в дисертації методи математичного та аналітичного моделювання можуть бути використані для визначення зміни характеристик теплообміну і гідродинаміки течій з різними фізичними властивостями, з різними початковими та граничними умовами, з різною геометричною постановкою задачі. Враховуючи результати розрахунків, які висвітлені в дисертаційній роботі, можливо підібрати певні діапазони таких параметрів течій, що можуть забезпечити необхідну інтенсивність теплообмінних процесів в елементах систем охолодження обладнання різного призначення та пристроїв з урахуванням масштабування їх розмірів.

2. Досліджені механізми виникнення відцентрової гідродинамічної нестійкості Діна та Тейлора, що виникають при русі потоку з наночастинками в криволінійних каналах дають можливість визначити режим потоку та визначити його фізичні характеристики, які необхідно враховувати при виготовленні нанорідин з різною основою та з різними нанорозмірними домішками. Також розрахунки дають змогу регулювати характеристики потоку за для швидшого досягнення рівномірної структури нанорідини, тобто скоротити час її виготовлення.

3. Результати досліджень впливу геометричних характеристик мікроканалів на теплообмін та характеристики течії з неідеальними фізичними властивостями є важливими при дослідженні та проектуванні

мікроелектронних та мікромеханічних систем різноманітного призначення. Як приклад такого обладнання можна навести різноманітні мікросенсори, мікрофільтри, мікроударні трубки.

4. Розвинена теорія різкого нестационарного переходу до плівкового кипіння нанорідини дозволила визначити вплив наявності наночастинок на теплообмінні характеристики та гідродинаміку процесів кипіння, а також визначити механізми їх інтенсифікації. В результаті це дає можливість оптимізувати технологічні процеси загартування та охолодження, в яких використовуються нанорідини, а саме, скоротити час, який потрібен для отримання певної структури металу до 20%.

5. Результати дослідження двофазних процесів нанорідин дозволили сформулювати рекомендації щодо здійснення регулярного контролю та подальшого виробничо-технологічного використання гартувальних середовищ для ТОВ «Тотал Флюїд менеджмент». Зокрема, нанорідин з функціональними домішками полімерів для оптимізації процесу гартування металевих зразків.

6. Отримані в дисертаційній роботі результати розрахунків в рамках договору «Розрахунок тепломасообмінних та гідродинамічних процесів у мікроканалах сенсорів тиску» були використані при оптимізації вибору конструктивних рішень під час розробки сенсорів тиску, які можуть застосовуватися виробниками датчиків (перетворювачів) тиску в якості чутливих елементів приладів у промисловості. Є акт використання результатів роботи в ДП СКТБ.

7. На основі запропонованих розрахункових методик сформульований метод розпізнавання видів колонії мікроорганізмів, який базується на формфакторі бактерій для фармацевтичної та харчової промисловості.

Також матеріали дисертаційної роботи використані в розробці методики навчальної дисципліни «Теплоенергетичні установки і системи», «Нанотехнології інтенсифікації процесів тепломасообміну» та «Моделювання теплових і гідродинамічних процесів».

Повнота викладення наукових положень, матеріалів, висновків і рекомендацій дисертації в опублікованих працях

Основний зміст дисертації викладено в 36 публікаціях. Здобувачка є співавтором 2 монографій; 12 статей опубліковано в наукових фахових виданнях України; 18 статей опубліковано в виданнях, що індексуються наукометричними базами даних Scopus та Web of Science. Результати досліджень по дисертаційній роботі доповідалися на 4 міжнародних наукових конференціях, про що свідчать опубліковані тези доповідей. Наукові публікації здобувача мають високий науковий рівень, оскільки журнали, в яких опубліковано результати дисертації, відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank відносяться до першого квартилю (Q1) – 10 статей, до другого (Q2) – 5 статей, до третього (Q3) – 3 статті.

Коротка характеристика змісту роботи

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою. Текст дисертації складається зі вступу, шести 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 таблиць.

Відповідно до змісту роботи у *вступі* викладена та обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи. Показаний зв'язок наукових досліджень з науковими програмами, планами і темами, співвиконавцем яких є здобувачка. Сформульовані мета і основні завдання досліджень, описані об'єкт, предмет і методи досліджень, наведено положення про наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, а також наведено дані про апробацію результатів дисертаційної роботи на конференціях, та представлено відомості про особистий внесок здобувача та його публікації за темою дисертації.

У *першому розділі* дисертації наведений огляд літературних джерел за темою дисертаційної роботи. Розглянуті перспективи та особливості застосування мікроканальних систем, нанорідин, газів Ван дер Ваальса та

біоконвективних течій в елементах теплообмінного обладнання. Висвітлені основні аспекти динаміки розвитку мікропотоків та нанопотоків, течій бактерій та реальних газів. Наведені сучасні методи аналітичного та математичного вивчення процесів тепломасообміну та гідродинаміки течій з урахуванням мікромасштабів. Описані особливості перебігу процесів з фазовими перетвореннями в нанорідинах. Визначені ефекти впливу твердих нанорозмірних частинок на характеристики теплообміну під час фазових переходів. Описані властивості газу Ван дер Ваальса і особливості його застосування в різноманітних конструкторських та технологічних рішеннях, та вплив його на характеристики робочих процесів.

Великий об'єм опрацьованих літературних джерел дав змогу сформулювати мету дисертаційного дослідження, а також задачі, які потрібно вирішити.

У *другому* розділі описані методи математичного та аналітичного моделювання, які використані в дисертаційній роботі, що дозволяють досліджувати гідродинаміку течій на мікрорівні та макрорівні.

При моделюванні процесів мікро- та наномасштабного тепломасопереносу не можливо використовувати традиційні закони, як при моделюванні теплообміну та гідродинаміки в макросередовищах. Оскільки вони не дають точного трактування динаміки розвитку течії на мікрорівні.

Метод ґраток Больцмана – LBM (Lattice Boltzmann Method) використовує кінетичне рівняння Больцмана, відповідні співвідношення на мікроскопічному рівні і рівняння переносу на макроскопічному рівні. Переваги LBM полягають у простих процедурах обчислення, які підходять для паралельних обчислень; легкості і надійності при роботі з багатофазним потоком, складною геометрією.

Ренормалізаційногруповий (RNG) підхід ефективний у використанні при низьких та високих числах Рейнольдса (ламінарні, перехідні та повністю турбулентні течії).

Для вивчення процесів нестійкості ламінарного потоку використаний метод малих збурень. В основі методу збурень потік, що рухається розкладається на основний та збурений, який є накладеним на основний.

Задається форма збурюючого руху. В ході математичних перетворень отримується рівняння для амплітуд збурень. Основною метою рішення рівняння для амплітуд збурень є визначення критичного значення числа Рейнольдса, яке є індикатором стійкості течії.

Вирішення задач теплообміну та гідродинаміки з використанням груп симетрій (груп Лі), значно розширює різні спеціальні методи інтегрування певних типів рівнянь.

У *третьому розділі* моделюються процеси теплообміну та гідродинаміки в мікроканалах різної геометрії. Наведені процедури аналітичного моделювання теплообміну та гідродинаміки в мікроконфузорі, в мікродифузорі, в плоскому мікроканалі, що обертається, та в мікросціліні з урахуванням умов проковзування. В ході проведених математичних перетворень виявлений вплив умов проковзування на профілі швидкості та температури. Отримані вирази для розподілу гідродинамічних та теплофізичних параметрів мікропотоків. Виконані порівняння результатів аналітичного рішення з результатами, що отримані на основі застосування методу ґраток Больцмана.

У *четвертому* розділі досліджені процеси нестійкості Діна та нестійкості Тейлора в криволінійних каналах, які виникають при виготовленні нанорідин. Визначено вплив ряду фізичних та геометричних параметрів на процеси нестійкості нанотечії. Аналітично досліджено вплив параметрів наногазу на процес проходження через прямий скачок ущільнення, використовуючи умови Ренкіна - Гюгонію. Виявлено вплив концентрації наночастинок в газі на параметри ударної хвилі.

В роботі досліджено вплив наночастинок на параметри турбулентного потоку за допомогою методу ренормалізаційних груп. Отримано вираз для пренормованої турбулентної в'язкості з урахуванням концентрації наночастинок.

У *п'ятому* розділі представлено результати дослідження фазових переходів в нанорідинах. Запропоноване аналітичне рішення задачі конвективного теплообміну між нагрітою стінкою та плівкою пари, яка утворилася миттєво на поверхні з урахуванням умов не стаціонарності. При

моделюванні використані два підходи, а саме, метод Хевісайда та метод симетрій. На основі запропонованого рішення для чистої рідини рішення була розв'язана аналогічна задача конвективного теплообміну між паровою плівкою з наночастинками та нагрітою стінкою. Рішення поставленої задачі дало змогу оцінити вплив різної концентрації наночастинок на інтенсивність процесу теплообміну в паровій плівці.

Наведений розв'язок задачі нестійкості парової плівки з наночастинками, що утворилася на нагрітій поверхні. Отриманий вираз для критерію стійкості парової плівки з наночастинками та визначена область чисел Рейнольдса де проявляється дестабілізуючий вплив наночастинок на парову плівку.

У розділі наведені результати експериментального дослідження процесу гартування циліндричного металевого зразка в нанорідині.

У *шостому* розділі запропоновано комплекс аналітичних методів дослідження природної конвекції в газі Ван дер Ваальса, який включає в себе метод симетрій, спрощений аналітичний метод та метод інтегральних співвідношень. Отриманий вираз для числа Нуссельта, який враховує вплив параметрів газу Ван дер Ваальса. Запропонований комплекс методів дає змогу визначити вплив параметрів газу Ван дер Ваальса на параметри гідродинаміки та теплообміну при вільній конвекції. Також представлено рішення задачі проходження газом Ван дер Ваальса через прямий скачок ущільнення (ударна хвиля).

У *сьомому* розділі досліджені процеси нестійкості біоконвективної течії в пористих середовищах. Запропоновано математичну модель біоконвекції в пористому середовищі при наявності у потоці певної концентрації мікроорганізмів різної форми. На основі запропонованої математичної моделі, використовуючи метод збурень був отриманий критерій стійкості біоконвективної течії в пористому середовищі в залежності від форми мікроорганізму та параметрів самої пористої структури при наявності та при відсутності адсорбції. Виявлений вплив геометрії пористої структури на гідродинамічну нестійкість течії.

Висновки достатньо повно відображають хід розв'язання поставлених у роботі завдань, містять основні результати дисертаційного дослідження та їх аналіз.

Список використаних джерел повний і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації.

Відповідність роботи вимогам МОН України.

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, виконана на достатньо високому науково-теоретичному рівні, оформлена у повній відповідності нормам і правилам Міністерства освіти і науки України щодо написання та оформлення дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук.

Автореферат за структурою і технічним оформленням відповідає визначеним Міністерством освіти і науки України стандартам, його зміст повністю відповідає змісту дисертаційної роботи.

Дискусійні питання та зауваження до дисертаційної роботи, які потрібно пояснити:

Представлений текст дисертаційної роботи дає змогу зробити висновок про високий науково-дослідницький рівень отриманих результатів, їх оригінальність та вагомість авторських узагальнень.

Аналізуючи зміст поданої до захисту дисертаційної роботи та зроблені висновки, вважаю за потрібне виокремити низку дискусійних положень, а саме:

1. Потрібно пояснити необхідність доводити еквівалентність «ґратчастого» рівняння Больцмана і рівняння Нав'є-Стокса.
2. При розрахунку спектру турбулентності і визначенні зв'язку між (диференційне рівняння для ефективної в'язкості 2.3.31) та коефіцієнта дисипації (рівняння 2.3.32) пропонується $\gamma = 1,75$, а приймається $\gamma = 4/3$. По тексту відсутні пояснення.
3. При дослідженні течій в мікроканалах виявлений вплив числа Кнудсена на теплообмін, який обумовлений розрідженням теплоносія біля стінки

або ефектом проковзування. Для газового теплоносія цей ефект має фізичне пояснення, який описаний в дисертації, але не дано пояснення фізичного механізму впливу ефектів проковзування для рідин.

4. Отримані профілі швидкості, згідно рівнянь 3.3.17 та 3.3.18 і рис.3.3.2, вирішують задачу на стабілізованій гідродинамічній ділянці. Яким чином можна визначити особливості течії і теплообміну на початковій ділянці, її довжину при умові виникнення ковзання на стінці?
5. У роботі при розгляді плівкового кипіння на вертикальній поверхні використовується значення $Nu_0 = 1$ (формула 5.1.36), що потребує пояснень та обґрунтування.
6. При моделюванні задачі проходження газу Ван дер Ваальса через пряму ударну хвилю не обґрунтовано необхідність використання моделі Ван дер Ваальса для розрахунку ударних хвиль.
7. Чому в математичній моделі для розрахунку біоконвективної течії не брався до уваги нелінійний член Форхаймера для врахування параметрів пористих середовищ?
8. При представленні результатів фізичного експерименту по охолодженню зразка металу в нанорідині необхідно навести аналіз похибки досліджень і обробки експериментальних даних.

Вказані зауваження не знижують загального позитивного враження від дисертаційного дослідження Дмитренко Н.П., яке має велику значимість для розвитку методів аналітичного дослідження процесів тепломасообміну та гідродинаміки мікро- нано- та біопотоків.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Дмитренко Наталії Павлівни на тему **«Тепломасообмін та гідродинаміка в мікросистемах з неідеальним середовищем та біоконвективними течіями»** є науковою працею, яка відповідає пунктам 7, 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), а її автор, Дмитренко Наталія Павлівна, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Отримані результати та висновки мають наукову новизну, важливе теоретичне та практичне значення, роблять безперечний внесок у розвиток теоретичних досліджень процесів тепломасообміну та гідродинаміки на мікро- та нанорівні. Дослідження виконано на високому науковому рівні, матеріал викладено чітко й обґрунтовано. Використано багато графічних узагальнень результатів моделювання, що значно полегшує сприйняття матеріалу. Усі висновки є чітко аргументованими.

Офіційний опонент:
доктор технічних наук,
професор Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри атомної енергетики

Валерій ТУЗ

Підпис Валерія ТУЗА засвідчує
в.о. директора ННІАТЕ



Євген ПИСЬМЕННИЙ