



ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Євдокимова Дмитра Васильовича
«Математичні моделі та чисельні методи теорії потенціалу для задач
гідродинаміки і тепломасообміну при малих числах Рейнольдса»,
подану до захисту на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук за спеціальністю
01.02.05 - механіка рідини, газу та плазми

Актуальність роботи. Дисертаційна робота Євдокимова Д. В. «Математичні моделі та чисельні методи теорії потенціалу для задач гідродинаміки і тепломасообміну при малих числах Рейнольдса» присвячена розробці високоефективного розрахункового інструментарію для широких класів інженерно-технічних та науково-дослідних задач про течії при малих числах Рейнольдса та пов'язані з ними природні і технологічні процеси, наприклад, тепломасообмін у таких течіях. У теперішній час набули суттєвої актуальності дослідження та технології, що відносяться до мікробіології, мікроелектроніки, мікромеханіки, а всі течії, які відбуваються у релевантних пристроях та системах вказаних галузей науки та технології, протікають не просто при малих числах Рейнольдса, а, як правило, при асимптотично малих значеннях цього параметру. З чого можна зробити висновок про безумовну актуальність дослідження течій при малих числах Рейнольдса для розвитку науки та технологій у зазначених галузях, що швидко розвиваються у теперішній час. Разом з тим розвиваються й традиційні галузі, у яких течії при малих числах Рейнольдса відіграють важливу роль. В першу чергу, це багатофазні течії, де течії при малих числах Рейнольдса проявляються при русі об'єктів дисперсної фази. Такі течії складають основу технологічних процесів у хімічній промисловості, медичній промисловості, промисловості будівельних матеріалів, гірничозбагачувальних процесах у гірничій промисловості, тепловій енергетиці, а якщо додати процеси тепломасообміну на поверхні крапель чи бульбашок, то до наведеного переліку слід додати захист рослин у аграрному виробництві, а також гідрометеорологічні та екологічні дослідження. Наведений короткий аналіз дозволяє стверджувати, що течії при малих числах Рейнольдса на сьогодні належать до найактуальніших процесів механіки рідини та газу. Другим напрямком, у якому течії при малих числах Рейнольдса та процеси тепломасообміну у них відіграють суттєву роль, виявилися технології при малих

числах Рейнольдса в умовах мікрогравітації, тобто у космічних літальних апаратах, де знаходяться рідинні середовища під дією малих масових сил. Важливість ефектів, що розглядаються, для дослідження та засвоєння космічного простору, створення специфічних космічних технологій представляє другий момент, який визначає актуальність представленої роботи. В решті решт, розвиток обчислювальної теорії потенціалу, розробка нових та вдосконалення існуючих алгоритмів, а також способів їх програмної реалізації та тестування вельми актуальні для сучасної обчислювальної гідромеханіки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Частини представленої дисертаційної роботи були виконані в рамках науково-дослідних робіт, що виконувалися за участю автора дисертації в науково-дослідній лабораторії моделювання процесів механіки рідини і газу та тепломасообміну Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара: № 1-256-12 «Математичні моделі та чисельні методи теорії потенціалу та задачі оптимізації механічних і тепломасообмінних процесів в гетерогенних середовищах» (ДР № 0112U000186, 2012 - 2014 рр.); № 1-302-15 «Математичні моделі, методи розрахунку та експериментальні дослідження багатомасштабних механічних та тепломасообмінних процесів у гетерогенних середовищах» (ДР № 0115U002394, 2015 - 2017 рр.); № 1-327-17 «Розробка нового покоління високоефективних методів розрахунку гідродинамічних та тепломасообмінних процесів у ємкостях ракетно-космічної техніки» (ДР № 0117U001209, 2017 - 2019 рр.); № 390-05 «Фізичне та математичне моделювання кризи кипіння» (ДР № 01063U000817, 2005 - 2006 рр., Договір № М / 228-2005 за програмою спільних дій в галузі науково-технічного співробітництва між Україною та Францією («Дніпро»)).

Новизна наукових положень та висновків. Більшість результатів та висновків дисертаційної роботи є новими та отримані вперше. У роботі за допомогою асимптотичних методів узагальнено та вдосконалено низку існуючих математичних моделей мікрогідродинаміки, теорії багатофазних течій, теорії гідродинаміки та тепломасообміну в умовах мікрогравітації. До крайових задач, сформульованих у рамках отриманих математичних моделей, були застосовані нові запропоновані та вдосконалені існуючі алгоритми обчислювальної теорії потенціалу. Результати розв'язку тестових та актуальних задач підтвердили високу точність та ефективність запропонованого підходу.

До нових наукових результатів, отриманих у дисертації слід віднести:

– Запропоновано два принципово нових класи алгоритмів граничних елементів. Перший це регулярні алгоритми методу граничних елементів з точками колокації всередині області розв'язку. Переваги цих алгоритмів у тому, що вони ґрунтуються на наближених регулярних граничних інтегральних рівняннях другого роду, які завжди коректні, тобто такі алгоритми мають високу функціональну надійність. Другий клас це нові асимптотичні алгоритми методу граничних елементів для визначення малих збурень межі області розв'язку чи крайових умов та новий асимптотичний адаптивний алгоритм методу граничних елементів.

– Побудовано розкладання Уайтхеда для течій в'язкої рідини у обмежених областях, наближення Стокса співпадає з першим членом цього розкладання. Методом Хьормандера побудовані матриці фундаментальних розв'язків для системи рівнянь Стокса у різних формулюваннях та системи рівнянь Онзагера.

– Для розрахунку багатофазних течій Стокса було застосовано метод М. Смолуховського, який було узагальнено та вдосконалено.

– Побудовано асимптотичну математичну модель повільних фазових переходів, до якої потім успішно застосовано метод граничних елементів. Запропоновано математичну модель гомотетичного зростання тіл при повільних фазових переходах. Показано, що течія Стефана повільного фазового переходу є течією Стокса.

– Сформульована та розв'язана за допомогою методу граничних елементів задача про міжфазову рівновагу у паливному баку ракети у тривалому інерціальному польоті. Побудована інтегральна математична модель та запропоновано метод розрахунку слабкої вільної конвекції.

– Розглянута технічна проблема течій рідини та тепломасообміну у паливному баку космічного апарату у довготривалому інерційному польоті.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність. Достовірність отриманих в дисертаційній роботі результатів забезпечується: використанням класичних, загальноновизнаних математичних моделей гідродинаміки в'язкої рідини та теорії тепломасообміну; використанням суворих математичних перетворень; ретельним тестуванням запропонованих алгоритмів за спеціальними методиками; порівнянням отриманих результатів розрахунків з відомими аналітичними та чисельними результатами інших авторів. Тобто автор застосував у роботі традиційні шляхи забезпечення достовірності, а до того ж розробив оригінальну методику тестування програмного забезпечення та аналізу якості алгоритмів.

Практичне значення одержаних результатів. Результати роботи, що рецензується, мають явну практичну спрямованість щодо створення прикладного програмного забезпечення та розв'язання актуальних задач гірничої промисловості, ракетно-космічної техніки тощо. За думкою автора роботи основними напрямками практичної реалізації дослідження має бути: дослідження космічного простору для аналізу процесів тепломасообміну з фазовими переходами, для аналізу течій рідини і процесів тепломасообміну в паливних баках космічних апаратів в умовах довготривалого інерційного польоту; екологія, гідрометеорологія, хімічні та гірничозбагачувальні технології для розрахунку малих рухів частинок дисперсної фази, зважених в повітряному або водному середовищі з урахуванням фазових переходів та інших процесів тепломасообміну в околі частинок дисперсної фази. Однак представляється, що завдяки універсальному характеру запропонованих алгоритмів та розробленого програмного забезпечення сфера ефективного застосування результатів дисертаційного дослідження може бути значно розширена, чого й хотілося побажати автору. Вкрай бажаним представляється також продовження співпраці автора з фахівцями ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля» з питань розвитку технологій мікрогравітації, розпочате у даній роботі. Слід зазначити, що матеріали дисертаційного дослідження були впроваджені в навчальний процес Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Результати роботи були застосовані при підготовці лабораторного практикуму з курсу «Методи дослідження процесів тепломасообміну», що викладається на механіко-математичному факультеті зазначеного університету.

Повнота викладення результатів дисертації у опублікованих працях та у авторефераті. Результати дисертації опубліковано у 39 роботах, з яких 7 статей у фахових виданнях України, 4 публікації проіндексовані у наукометричних базах даних (SCOPUS, WoS), 3 статті проіндексовано у наукометричній базі даних «Index Copernicus», 1 колективна монографія в Україні, 26 публікацій, що підтверджують апробацію роботи та науковий пріоритет автора, 1 навчальний посібник, який засвідчує впровадження результатів роботи у навчальний процес Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Зазначені публікації достатньо повно та точно розкривають зміст дисертаційної роботи, у достатньо повному обсязі відображають основні наукові результати, що були отримані у роботі. Положення та результати дисертації було представлено до обговорення на 49 наукових конференціях та семінарах. Зміст автореферату у достатній мірі

відповідає змісту дисертації. Автореферат написано та оформлено згідно усіх вимог, що ставляться до авторефератів кандидатських дисертацій.

Структура дисертації. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, семи додатків, висновків, списку використаних джерел, а також містить всі інші елементи, що передбачені вимогами до кандидатських дисертацій.

Коротко зупинимося на змісті основних елементів дисертації. До вступу автор включив всі відомості про роботу, що передбачені існуючими вимогами. Перший розділ має оглядовий характер, слід зазначити, що огляд літератури достатньо повний, а аналіз сучасного стану питання виконаний ретельно. Другий розділ містить описи двох запропонованих сімейств алгоритмів, перше з яких це алгоритми обчислювальної теорії потенціалу з точкою колокації усередині області розв'язку, особливість таких алгоритмів полягає у тому, що вони ґрунтуються на наближених регулярних граничних інтегральних рівняннях другого роду, тобто на коректній задачі, яка не потребує складного обчислення сингулярних інтегралів; а друга група алгоритмів має за основу сумісне застосування метода граничних елементів та асимптотичних методів, в яких у якості малого параметра використовується відносний розмір граничного елемента, ця група алгоритмів спрямована на розв'язання важливого як з теоретичної точки зору, так й для прикладного застосування класу задач з малими збуреннями крайових умов чи форми межі. Перелічені алгоритми є принципово новими та переважають аналоги, що існували раніше, за низкою параметрів та властивостей. Третій підрозділ повністю присвячений застосуванню методів теорії потенціалу та лагранжевих методів до течії Стокса. Він розпочинається з застосування розкладання Уайтхеда до течій Стокса у обмеженому просторі, де не мають місце парадокси Стокса та Уайтхеда. Матеріали розділу продовжуються побудовою матриць фундаментальних розв'язків для різних форм та випадків системи рівнянь Стокса, що дозволяє будувати для них граничні інтегральні рівняння та розв'язувати їх методами обчислювальної теорії потенціалу. Нарешті, останнім питанням третього розділу став метод М. Смолуховського, його вдосконалення та узагальнення. Слід зазначити, що метод М. Смолуховського у класичному варіанті це інженерний наближений лагранжевий метод розрахунку багатофазної течії Стокса. Автор роботи, що рецензується, запропонував застосовувати метод М. Смолуховського разом з методом граничних елементів, а також поширити можливості методу М. Смолуховського за рахунок розширення набору апроксимуючих функцій, застосування граничноелементних апроксимацій,

включення до розгляду у методі М. Смолуховського задач тепломасообміну у течіях Стокса та деяких інших прийомів. Предметом розгляду четвертого розділу стали процеси тепломасообміну. Автору належить ідея застосування методу граничних елементів разом з асимптотичним розкладанням за малим числом Стефана для чисельного розв'язання задачі Стефана для повільного фазового переходу. Автору вдалося показати, що течія Стефана (течія, що виникає при фазовому переході внаслідок стрибка густини) для повільного фазового переходу є течією Стокса. Це принциповий результат, що має значення для гідродинаміки і теорії тепломасообміну взагалі. Окремо був розглянутий випадок повільного фазового переходу на поверхні бульбашок та крапель: у цьому випадку внаслідок дії сил поверхневого натягу бульбашки та краплі зберігають свою сферичну форму під час фазового переходу, що змушує формулювати задачу, відмінну від традиційної задачі Стефана. Четвертий розділ було продовжено застосуванням методів теорії потенціалу та асимптотичних методів до системи рівнянь Онзагера. Нарешті, наприкінці четвертого розділу розглянуті питання застосування розроблених підходів до деяких багатофазних систем, що зустрічаються у виробничих технологіях. Течії Стокса та процеси тепломасообміну у них в умовах мікрогравітації були розглянуті у п'ятому розділі. Основна увага у цьому розділі була приділена процесам усередині паливних баків космічних апаратів. Наприклад, у майже повністю заповненому паливному баку під дією нагріву сонячним випромінюванням та охолодження тепловим випромінюванням у навколишній космічний простір може утворитися багатофазна система, що призведе до зміщення центру мас конструкції з осі симетрії баку. Проте для випадку неповністю заповненого баку у тривалому інерційному польоті, коли паливо розташоване відносно тонким шаром вздовж його внутрішньої поверхні, були розглянуті задачі про течію Стефана та температурно-капілярну й дифузійно-капілярну конвекцію, які, як показано, теж є течіями Стоксу. Для випадку багатофазної системи в умовах мікрогравітації серед сил, що діють на частинки дисперсної фази, розглядалися сили термофорезу, дифузіофорезу та ефект Марангоні, а поле масових сил у процесах флотації та седиментації відповідно було досить малим. Нарешті було розглянуто задачу про слабку вільну конвекцію з точки зору течії Стокса.

Робота містить сім додатків, шість з яких присвячені допоміжним задачам. Така велика кількість допоміжних задач є природним наслідком аналізу у роботі складних технічних систем. В цілому, дисертаційну роботу

написано та оформлено відповідно до існуючих вимог. Всі розділи дисертації мають закінчений зміст та струнку логічну побудову.

Зауваження до дисертації. По дисертації, що подана на рецензування, треба зробити наступні зауваження:

1. Автор вживає терміни «надійність програмного забезпечення» та «надійність алгоритму», однак не надає їх визначення, що може призвести до непорозуміння.

2. У розділі четвертому автор показав, що течія Стефана для повільного фазового переходу є течією Стокса, однак не зазначив у якому діапазоні визначальних параметрів справедлива ця теза. Внаслідок цього, наприклад, не ясно чи може вона бути застосована до парогенераторів сучасних теплових та атомних електростанцій?

3. Автор не навів порівняння запропонованих їм алгоритмів з методами скінченних різниць та скінченних елементів, що зазвичай застосовуються у гідромеханіці, в тому числі й для малих чисел Рейнольдса.

4. Не завжди побудова роботи має раціональну структуру, наприклад, при дослідженнях по тематиці розділу п'ятого показано, що під дією сонячного випромінювання та теплового випромінювання у навколишній космічній простір, в результаті фазових переходів, пов'язаних з цими процесами теплообміну, центр мас конструкції космічного літального апарату може зміститися від осі симетрії баку й космічного літального апарату в цілому, що може призвести до небажаних наслідків. Але цей результат, який, з технічної точки зору, слід вважати одним з найкращих у роботі, отримано у Додатку 5, а не в основних розділах роботи. Вкрай бажано було б надати рекомендації по запобіганню цього ефекту.

5. З тексту роботи не ясно, чи мова йдеться про існуючі технологічні та технічні системи, чи досліджуються перспективні технології та технічні рішення, що ще не реалізовані на практиці.

6. У списку використаних джерел двічі наведена книжка О. О. Ладиженської номера 56 та 312 відповідно та книжка К. Позрікідіса номера 55 та 355 відповідно.

7. У роботі знайдено декілька друкарських помилок, невдалих виразів та позначень.

Зазначені зауваження ніяк не можуть поставити під сумнів обґрунтованість та достовірність основних результатів дисертаційної роботи Євдокимова Д. В., та не можуть змінити її загальну позитивну оцінку.

Висновок. Дисертація Євдокимова Д. В. «Математичні моделі та чисельні методи теорії потенціалу для задач гідродинаміки і тепломасообміну при малих числах Рейнольдса» є цілісним та завершеним науковим дослідженням, в якому отримано наукове рішення актуального наукового завдання: створення розрахункового інструментарію для аналізу течій при малих числах Рейнольдса та процесів тепломасообміну у таких течіях, спрямованого на розвиток методів математичного моделювання повільних в'язких течій. Тема і зміст дисертації цілком відповідають паспорту спеціальності 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми. За актуальністю теми, обсягом, новизною та науковим рівнем досліджень, теоретичним та практичним значенням одержаних результатів, повнотою їх викладення у тексті дисертації та наукових публікаціях дисертаційна робота Євдокимова Дмитра Васильовича на тему «Математичні моделі та чисельні методи теорії потенціалу для задач гідродинаміки і тепломасообміну при малих числах Рейнольдса» відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів» затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року зі змінами, а її автор Євдокимов Дмитро Васильович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри транспортних технологій
та міжнародної логістики
Університету митної справи та
фінансів Міністерства освіти і науки України,
доктор технічних наук, професор

А. В. Сохацький

