

ВІДГУК
офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Баранець Віталії Олександрівни**

«ЗАДАЧІ МЕХАНІКИ СУСПЕНЗІЙ ЧАСТИНОК, ЩО АГРЕГУЮТЬ»,

що подана на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми.

Актуальність теми дисертації.

В останні роки відбувається бурхливий розвиток нанотехнологій в зв'язку з поширеним використанням наноматеріалів та нанорідин. Нанокомпозити відносяться до сучасних технологічних матеріалів, які широко використовуються на практиці для відповідальних покриттів інженерних споруд та систем, завдяки їх внеску в значне зміцнення за збереження легкості відповідальних об'єктів. Нанорідини, як суспензії наночастинок і полімерних молекул, мають високу тепло- і електропровідність, низьку теплоємність, унікальні електромагнітні властивості. Це привело до активного розвитку мікро- і наногідромеханіки як розділів механіки рідини, що вивчають фізичні властивості і закономірності течій рідини на мікро- та нано - рівнях.

Класичні динаміка рідини і термомеханіка - теорії, що розроблені для макроскопічних систем, не повністю застосовні як до суспензій наночастинок, так і до однорідних рідин на мікро- і нанорівні. Тому велика увага приділяється зараз розробці нових теоретичних моделей, методів, а також різних мікроелектромеханічних систем, в яких використовуються течії однорідних рідин, розбавлених і концентрованих суспензій наночастинок в мікро- і нанорозмірних каналах. Такі канали використовуються для проведення медичної діагностики на мікроскопічних зразках біологічних рідин і м'яких тканин, для очищення мікрооб'ємів рідини або, навпаки, змішування різнорідних рідин. Основні труднощі розробки мікро- і нанорідинних технологій пов'язані з тим, що характеристики течії не відповідають даним, які зазвичай розраховують на підставі класичних рівнянь Нав'є-Стокса.

Тому актуальним є дослідження ламінарних течій частинок суспензій в мікро- та нанотрубках, які використовуються у різних мікроелектромеханічних системах для проведення медичної діагностики, очищення мікрооб'ємів рідин або високооднорідного змішування різних рідин, що й обумовило тему дисертаційної роботи.

Висновки про обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, достовірність основних результатів.

При виконанні роботи використані фундаментальні положення механіки суцільних середовищ, методи класичної гідромеханіки, а також сучасні числові методи, а саме: метод характеристик для гіперболічної системи двох і трьох

рівнянь в частинних похідних і метод динаміки частинок. Використано власне програмне забезпечення, розроблене в середовищі C++. Експериментальні результати отримані здобувачкою власноруч з використанням методу Панченкова та його модифікації.

Задовільне узгодження результатів числового моделювання авторки з даними власно виконаних натурних експериментів й даними інших авторів свідчить про достовірність основних результатів, отриманих в ході дослідження.

Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі.

Основні наукові результати, що отримані в ході досліджень, є такими:

1. Вперше розроблені квазілінійні моделі осідання частинок дво- та трифазних суспензій, що агрегують, у вертикальних трубках в неоднорідному полі зовнішніх сил. При цьому розглянуто область, яка має дві рухомі границі з різними крайовими умовами на них, що дало змогу проаналізувати різні режими процесу осідання та дослідити сильні розриви на еволюційність

2. Вперше на основі трифазної моделі досліджено розмір та динаміку розмитої границі між зонами чистої плазми крові та агрегатів, що осідають, що є характерним при алергії на медичні препарати.

3. Здійснено узагальнення ефекту Бойкотта на випадок суспензій, які агрегують, що дало змогу отримати оптимальний кут нахилу, при якому частинки осідають з максимальною швидкістю.

4. З урахуванням граничних умов прослизання першого та другого порядку на шорстких поверхнях розв'язано рівняння Нав'є-Стокса для ламінарних течій суспензій мікро/наночастинок між паралельними пластинами та коаксіальними циліндрами, що обертаються, що дозволило узагальнити розрахункові формули для ротаційного віскозиметра для вимірювання в'язкості мікро- і нанорідин.

5. Вперше запропоновано і обґрунтовано показник часу $t_{\max}$ досягнення максимальної швидкості осідання еритроцитів для виявлення алергії на харчові продукти та лікарські препарати, як новий експрес-метод медичної діагностики на малих об'ємах крові.

6. На основі трифазної математичної моделі запропоновано новий апаратно-програмний комплекс для автоматичної реєстрації, обробки та аналізу седиментаційних кривих з метою використання в багатьох галузях, в тому числі і медичній діагностиці.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що авторкою дисертації розроблений новий експрес-метод медичної діагностики на малих об'ємах крові, на підставі чого зареєстрований патент на корисну модель; знайдено оптимальний кут нахилу трубки, при якому частинки суспензії осідають з максимальною швидкістю; на основі трифазної моделі крові; з'ясовано феномен виникнення та еволюції розмитого стовпця рідини на границі між зоною чистої плазми крові та еритроцитами, що осідають, під час проведення тесту на швидкість осідання еритроцитів.

Згідно з даними Всесвітньої організації охорони здоров'я приблизно 10-30% населення світу страждає від алергічних реакцій, а кількість таких осіб щорічно зростає, тому створення нового експрес-методу медичної діагностики алергічних залежностей на малих об'ємах крові, має значну практичну цінність. Так при перевірці наявності алергії на кілька алергенів або лікарських препаратів це дає можливість використовувати невеликий об'єм крові із пальця, що значно спрощує процедуру проведення тесту, зменшує ступінь її болючості для пацієнта, а отже дає переваги у порівнянні зі стандартним тестом.

Оцінка структури, обсягу та змісту роботи. Дисертація складається з анотації, змісту, умовних позначень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 186 найменувань на 19 сторінках, та одного додатка. Повний обсяг роботи – 188 сторінок. Обсяг основної частини дисертації – 156 сторінок.

Анотация і публікації автора повністю розкривають основний зміст дисертації.

У вступі авторка обґрунтовує актуальність обраної теми, формулює мету і завдання дослідження, визначає предмет і об'єкт дослідження, зазначає наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, приводить дані щодо публікацій та апробації результатів дослідження.

У першому розділі здобувачка провела аналітичний огляд моделей руху і взаємодії мікро- і наночастинок в суспензіях з урахуванням парних сил взаємодії між частинками, а також зовнішніх об'ємних сил, що діють з боку рідини. Розглянуті математичні моделі, які використовуються при описі процесів агрегації, структуроутворення і розділення фаз у біоколоїдах і суспензіях, на основі рівняння Смолуховського, його неперервного аналогу та їх численних модифікацій, що враховують особливості агрегації, властивостей твердої і рідкої фаз, адекватно описують процеси, що протікають у суспензіях органічних макромолекул, крові та інших біологічних рідинах. Надано огляд математичних моделей суспензій частинок, які осідають в похилих трубках, проаналізовано підхід механіки суцільних середовищ, заснований на двофазній теорії. На основі проведеного аналізу літературних джерел обґрунтовано мету дослідження і шляхи розв'язання сформульованих задач дисертації.

Другий розділ присвячено дослідженню квазілінійних системи двох і трьох диференціальних рівнянь гіперболічного типу, які описують осідання частинок суспензії, що агрегують. Для концентрованих суспензій доведено, що в одновимірному випадку система рівнянь, яка описує розподіл концентрацій та об'ємів частинок, що осідають та агрегують, залишається гіперболічною, й тоді, коли коефіцієнт опору Стокса залежить від розміру і форми агрегату, при осіданні в полі неоднорідної сили, та при подальшому узагальненні вхідної одновимірної моделі. З метою детального дослідження осідання та агрегації частинок з урахуванням захоплення базової рідини в агрегатах запропоновано трифазну модель суспензії частинок, що агрегують, у неоднорідному полі сил. Відмінність математичного формулювання задачі від відомих на цей час полягає в тому, що система рівнянь розв'язується в області, яка має дві рухомі

границі з різними крайовими умовами на них, що значно ускладнює процедуру пошуку розв'язку. Крім того, в даному розділі започатковано дослідження еволюційності (стійкості) сильних розривів. З урахуванням властивостей розв'язків квазілінійної гіперболічної системи диференціальних рівнянь, що описують процес осідання і агрегації, досліджено умови існування різних типів розв'язків задачі. Саме ці дані дають змогу дослідити розриви на еволюційність. Побудовано також дискретну математичну модель, в якій окремі частинки розглядаються як тверді сфери, взаємодія яких визначається законами класичної механіки. При цьому тимчасова еволюція системи частинок, що взаємодіють, визначається шляхом інтегрування рівнянь динаміки Ньютона з урахуванням всіх парних взаємодій на малих проміжках часу. Сили взаємодії між частинками розглядаються у вигляді класичних потенційних сил, але враховуються також і непотенціальні сили, наприклад, тертя та непружні взаємодії сфер. На основі трифазної моделі суспензії досліджено явище виникнення розмитої границі між зоною чистої рідини та частинок, що осідають. Проводяться розрахунки й для більш ускладненої трифазної моделі суспензії частинок, що агрегують, яка враховує захоплення частини рідини всередині агрегатів. В цьому випадку отримано гіперболічну систему трьох квазілінійних рівнянь, розв'язок якої знаходиться методом характеристик.

У третьому розділі надано здійснені дослідження та узагальнення двофазної та трифазної моделей осідання та агрегації частинок у похилих трубках; нахил трубки скорочує відстань, яку кожна частинка має пройти, щоб досягти нижньої похилої стінки, що значно прискорює осідання. Коли частинка наближається до границі поділу й не може далі осідати, вона починає ковзання по границі. Використовується двофазний підхід до суспензії частинок, які агрегують. Сформульовані в цьому розділі задачі розглянуті у двовимірному випадку, що відповідає вузьким прямокутним каналам або прорізам віскозиметрів конусоподібного типу. Умови неперервності, рівняння збереження імпульсу дають систему диференціальних рівнянь в частинних похідних для швидкостей, тисків і числової концентрації агрегатів. Така ж сама модель в одновимірній постановці використана для моделювання осідання еритроцитів у вертикальних трубах, в тонких прорізах між стінками ротаційного віскозиметра циліндроподібного типу. За допомогою числових розрахунків виявлено, що збільшення початкової концентрації частинок, швидкості їх агрегації, наявності зовнішньої рівномірної сили і ненульового кута нахилу прискорюють осідання, а будь-яке зростання в'язкості рідини сповільнює його, що є фізично доречним. При невеликому збільшенні кута нахилу осідання прискорюється, а при деяких критичних кутах починає уповільнюватися внаслідок вищого зсувного опору в дуже в'язкій масі компактно розташованих агрегатів. На основі отриманих результатів запропоновано новий метод оцінки стійкості суспензії. Здійснено узагальнення ефекту Бойкотта на випадок двофазної та трифазної суспензій

У четвертому розділі запропоновано модель, що узагальнює класичну задачу ламінарної течії в'язкої рідини між коаксіальними циліндрами, які обертаються з різними швидкостями, на випадок мікро- або нанорідин з

урахуванням умов прослизання першого та другого порядків відповідно, а також наявності шарів незмішуваних рідин з різною в'язкістю або однієї суспензії мікро/наночастинок з різними концентраціями внаслідок взаємодії частинок з шорсткими стінками. Розв'язано задачу про тришарову ламінарну течію незмішуваних мікро- та нанорідин між коаксіальними циліндрами, які обертаються з різними кутовими швидкостями, з урахуванням умови прослизання другого порядку. Показано, що шляхом вибору параметрів рідини та матеріалу циліндричних поверхонь можна отримати течії з суттєво зниженим або підвищеним тертям на стінках. Цей ефект можна використати для різних задач прикладної мікрогідромеханіки як для змішування рідин, так і для розділення сумішей, для проектування ефективних мікро/нанорідинних пристроїв з низькими або високими напруженнями тертя на стінках шляхом використання відповідних, за властивостями рідин та матеріалів, циліндричних поверхонь. Слід зазначити, що за допомогою результатів, отриманих в четвертому розділі, проведено узагальнення розрахункових формул для вимірювання в'язкості мікро- та нанорідин для ротаційного віскозиметра.

В п'ятому розділі описані оригінальні експериментальні дослідження авторки, що проводились на базі лабораторії алергології Державної установи «Інститут дерматології та венерології Національної академії наук України». При проведенні експериментів використовувались зразки венозної крові пацієнтів, які звертались в лабораторію для проведення тесту на алергію до призначених їм лікарем препаратів. Під час аналізу експериментів виявлено, що час досягнення максимальної швидкості осідання еритроцитів $t_{\max}$ є адекватним діагностичним показником, який майже не залежить від початкової концентрації частинок і в'язкості плазми, а відображає лише швидкість агрегації еритроцитів. Результати досліджень довели, що осідання в трубках Панченкова і мікротрубках однакове для крові однієї і тієї ж людини. Однак різниця між контрольним зразком і зразком з потенційними алергенами виявилася більш чіткою саме у мікротрубках. Проведені експериментальні дослідження з осідання в трубках Панченкова і мікротрубках зіставлені з теоретичними даними, отриманими автором. Модифікація тесту з визначення швидкості осідання еритроцитів з додаванням до венозної крові невеликої кількості потенційного алергену (пилок, лікарський препарат або харчові алергени) дає новий спосіб для швидкої, дешевої та якісної оцінки алергії. З проведених експериментів випливає, що запропонований авторкою діагностичний показник такий, як час досягнення максимальної швидкості осідання, є саме такою характерною величиною, яка відносно слабо залежить від умов проведення експерименту, тобто від довжини і діаметру трубки, від початкової концентрації еритроцитів, а отже, є зручним інструментом для використання в клінічній діагностиці. На основі отриманих результатів зареєстрований патент на корисну модель, яка може використовуватись в медицині з метою виявлення алергії на медикаменти і харчові продукти.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна на кафедрі прикладної математики факультету

«Математики і інформатики у відповідності до тематики пріоритетних досліджень кафедри та в рамках державної науково-дослідної роботи за темою «Оптимальне керування, стійкість і стабілізація динамічних систем складної природи» (номер державної реєстрації: 0119 U002530).

Публікації та апробація результатів. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 35 наукових праць, серед яких 2 публікації індексуються міжнародною наукометричною базою (Scopus), 6 статей у наукових фахових виданнях України, 3 статті в зарубіжних спеціалізованих виданнях, що додатково відображають наукові результати дисертації, 10 публікацій надруковано в зарубіжних та вітчизняних спеціалізованих виданнях, 14 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Основні результати дисертаційної роботи були представлені на наукових конференціях всеукраїнського та міжнародного рівнів, а саме: науковій конференції для студентів та аспірантів «Сучасні проблеми математики та її застосування у природничих науках та інформаційних технологіях» (Харків, 2007 р.); XV Міжнародній конференції з механіки та сучасним прикладним програмним системам (Москва, Росія, 2007 р.); Міжнародній науковій конференції студентів та молодих вчених «Актуальні питання в сучасній медицині» (Харків, 2007 р.); Міжнародній науковій школі-конференції «Тараповські читання» (Харків, 2008 р.); 24-му симпозіумі з реології, (Москва, Росія, 2008 р.); Міжнародній науковій конференції «Нові математичні моделі механіки суцільних середовищ: побудова і вивчення» (Новосибірськ, Росія, 2009 р.); XIII Міжнародній конференції «Сучасні проблеми механіки суцільних середовищ» (Ростов-на-Дону, Росія, 2009 р.); X Всеросійській конференції «Біомеханіка – 2010» (Саратов, Росія, 2010 р.); наукових конференціях для студентів та аспірантів «Сучасні проблеми математики та її застосування у природничих науках та інформаційних технологіях» (Харків, 2010 р., 2011 р., 2012 р.); семінарі з біомеханіки (Лодзь, Польща, 2012 р.); Всеросійській школі-конференції «Математичне моделювання і біомеханіка у сучасному університеті» (Ростов-на-Дону, Росія, 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Математичне моделювання прикладних задач математики, фізики, механіки» (Харків, 2013 р.); семінарі з прикладних задач механіки суцільних середовищ (Кілі, Німеччина, 2013 р.); III Міжнародній конференції «Сучасні проблеми механіки» (Київ, 2015 р.); Міжнародній конференції «Фізика рідких матеріалів: сучасні проблеми» (Київ, 2016 р.); Міжнародній конференції «Нанотехнології і наноматеріали» (Львів, 2016 р.); Міжнародній конференції «Тараповські читання – 2016» (Харків, 2016 р.); IX Міжнародній конференції для спеціалістів та молодих учених «Фізика низьких температур», присвяченій 100-літтю NASU (Харків, 2018 р.); Міжнародній конференції «Біомеханіка – 2018» (Зелена Гора, Польща, 2018 р.)

У повному обсязі робота розглядалась та обговорювалась на наукових семінарах кафедри теоретичної механіки та кафедри прикладної математики Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна.

Відповідність щодо дотримання вимог до дисертаційних робіт.

Дисертація **Баранець Віталії Олександрівни** є завершеною науковою працею. В ній отримані нові наукові результати, що в сукупності розв'язують актуальну наукову задачу, пов'язану з розробкою методології розв'язання задач про осідання частинок дво- та трифазної суспензій, що агрегують, у вертикальних та похилих трубках в неоднорідному полі зовнішніх сил.

За змістом, метою і розв'язаними задачами дисертація цілком відповідає паспорту спеціальності 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми та профілю спеціалізованої вченої ради К 64.051.11. В цілому, дисертація відповідає пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. №567 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМ №656 від 19.08.2015, №1159 від 30.12.2015, №567 від 27.07.2016) щодо кандидатських дисертацій.

Викладене вище свідчить про високий науковий рівень роботи та її відповідність вимогам, що пред'являються до кандидатських дисертацій. Проте слід зазначити й ряд недоліків і висловити деякі побажання.

Основні зауваження по роботі

1. При формулюванні мети дослідження доцільно було б додати «створення та дослідження» квазілінійних моделей осідання частинок.

2. Чи є величина $\vec{a}_j(t)$ прискоренням водночас в формулах (2.54) та (2.55)? З (2.55) випливає, що $\vec{a}_j(t)$ - це швидкість.

3. Стор. 104. Рівняння (3.26) є не системою гіперболічних рівнянь, а сукупністю початкових та граничних умов для системи (3.25).

4. На стор. 115 йдеться про «запропонування на основі отриманих теоретичних та експериментальних даних нового методу для перевірки ступеня «старіння» суспензії», але далі про цей метод не згадується.

5. Стор. 124. Не ясно, що означає висловлення: «Проведені оцінки діапазонів значень констант C_1, C_2 в (3):, $C_1 \in [0.5; 1,31]$, $C_2 \in [1; 1,15]$ », а саме, що таке (3):?

6. Яким чином з рівнянь (4.16) отримані коефіцієнти з однаковим розподілом лінійної швидкості (4.17)?

7. Було б бажано навести в дисертації більш детальний опис моделі, за якою отримано патент.

Наявні деякі термінологічні неточності, а саме:

1. Не зовсім зрозуміло, що означають терміни: «найбільш оптимальний», стор. 115, «тензор швидкостей», стор. 117?

2. Стор. 121. Незрозуміло, що мається на увазі під «рівнянням тепла».

3. Стор. 124. Що мається на увазі під виразом «закони збереження для тензора напружень»?

4. Стор. 125. Замість «точних обчислень рівнянь Нав'є-Стокса» треба було б вжити «точних (або аналітичних) розв'язків рівнянь Нав'є-Стокса»

5. Наразі прийнято замість терміну «чисельний» вживати числовий, замість «метод кінцевих об'ємів» - метод скінчених об'ємів.

Автореферат дисертації повністю відповідає тексту дисертації.

Загальний висновок. Незважаючи на вказані недоліки, слід відзначити, що робота викликає цілком позитивне враження. Вражає кількість нових числових результатів та їх ретельне обґрунтування, проведення власного експериментального дослідження, кількість публікацій в провідних наукових виданнях та наявність патенту. Ця наукова праця є гідним продовженням робіт Харківської школи математиків та механіків. Роботу виконано на високому науковому рівні, а її результати мають як теоретичне так і практичне значення.

Дисертаційна робота **«Задачі механіки суспензій частинок, що агрегують»** є завершеною науковою працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, що в сукупності вирішують наукову задачу дослідження процесів осідання частинок дво- та трифазних суспензій, що агрегують, у вертикальних та похилих трубках в неоднорідному полі зовнішніх сил, що є суттєвим як при проектуванні та контролі роботи мікро- і нанорідинних пристроїв так і при використанні в медичній діагностиці для виявлення алергії на медикаменти та харчові продукти. Дисертація повністю відповідає спеціальності 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми.

На основі вищезазначеного вважаю, що дисертаційна робота **Баранець Віталії Олександрівни «Задачі механіки суспензій частинок, що агрегують»** відповідає пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. №567 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМ №656 від 19.08.2015, №1159 від 30.12.2015, №567 від 27.07.2016) щодо кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми.

Доктор технічних наук, професор,
провідний науковий співробітник
Інституту проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного Національної
академії наук України

О. О. Стрельнікова

Підпис Стрельнікової О.О. засвідчую

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Учений секретар
Інституту проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного Національної
академії наук України



К. В. Максименко-Шейко