

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету «Львівська політехніка»
д.т.н., професору Соколовському Ярославу Івановичу

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора Прасола Ігоря Вікторовича
на дисертаційну роботу **Стахіва Володимира Михайловича** на тему:
«Методи та моделі для автоматизованого проектування акустофлюїдних
мікроелектромеханічних систем» подану до захисту на здобуття наукового
ступеня доктора філософії з галузі знань 12 «Інформаційні технології» за
спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»

1. Актуальність теми дисертації та зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертаційної роботи є актуальною та своєчасною, оскільки відповідає сучасним науковим і прикладним запитам у галузі біомедичних технологій, мікрофлюїдики та нанотехнологій. Загалом, інтерес до розробки високоточних іощадних методів фокусування, сортування та розділення мікрочастинок, зокрема — живих клітин та дисперсних часточок у різноманітних біохімічних та медичних дослідженнях, є стабільно високим упродовж останніх десятиліть. Традиційні методи, такі як відцентрове розділення за градієнтом густини, хоча й поширені, але мають низку суттєвих обмежень: вони є малоефективними з точки зору швидкості, можуть пошкоджувати біооб'єкти та змінювати властивості чутливих до механічного впливу частинок.

Тому особливої значущості набуває дослідження та застосування сучасних неруйнівних фізичних принципів, зокрема акустофлюїдики, яка базується на інтеграції акустичних хвиль у мікрофлюїдні системи для безконтактного та селективного маніпулювання частинками в рідкому середовищі. Акустофлюїдні технології демонструють низку переваг, серед яких — висока точність, універсальність, відсутність механічного втручання та можливість роботи з непрозорими середовищами. Можливість застосування акустичних хвиль у

широкому діапазоні частоти (1,0 кГц – 500,0 МГц) забезпечує ефективне сортування частинок за їх розміром, густиною та стисливістю.

Таким чином, обране дисертантом наукове завдання є актуальним, має прикладне значення, а також відповідає світовим тенденціям розвитку мікротехнологій для біохімічних та біомедичних застосувань.

Дисертацію Стахіва В.М. виконано відповідно до основних напрямків досліджень, які проводились колективом кафедри систем автоматизованого проєктування Національного університету «Львівська політехніка», в яких автор брав безпосередню участь та був співвиконавцем.

2. Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна дисертаційного дослідження полягає у комплексній розробці та математичному обґрунтуванні методів та моделей для проєктування акустофлюїдних мікросистем, призначених реалізувати селективне сортування мікрочастинок. Зокрема:

- Удосконалено математичну модель акустичного поля в мікроканалі лаб-чипа та вперше запропоновано математичні моделі акустофлюїдних сепараторів, що дало змогу враховувати вплив трьох ключових фізичних процесів — поширення термов'язких акустичних хвиль, повзучої течії рідини та акустофоретичної взаємодії частинок з рідинним середовищем — у багатоканальній мікрофлюїдній системі. За рахунок цього забезпечено моделювання траєкторії руху мікрочастинок та отримано можливість оцінювати вплив конструктивно-технологічних параметрів лаб-чипа на ефективність розділення мікрочастинок.
- Важливою науковою новизною також є застосування методів машинного навчання з підкріпленням для автоматизації процесу підбору вхідних параметрів системи (частота, швидкість потоку, характеристики частинок) з урахуванням історії попередніх невдалих конфігурацій. Такий підхід відкриває перспективи адаптивного проєктування акустофлюїдних пристроїв нового покоління.

- Крім того, вперше експериментально верифіковано ефективність конструкцій зустрічно-штирових перетворювачів (ЗШП) з різною кількістю пальців, їх геометрією та апертурою для генерації стійких стоячих хвиль у рідинних мікроканалах, що дало змогу підвищити ефективність сортування частинок.

Наукові положення, сформульовані у дисертаційній роботі, є логічним підсумком теоретичних узагальнень, чисельного моделювання та експериментальних досліджень, проведених здобувачем. У роботі простежується логічна відповідність між поставленою метою, сформульованими завданнями, вибраною методикою дослідження та кінцевими результатами.

Обґрунтованість основних положень забезпечено використанням сучасного математичного апарату, застосуванням мультифізичних чисельних моделей у середовищі COMSOL Multiphysics®, а також проведенням аналізу впливу геометричних і фізичних параметрів на поведінку мікрочастинок в мікроканалах акустофлюїдних пристроїв. Висновки роботи підтверджуються результатами моделювання та порівняльного аналізу різних конфігурацій лаб-чипів.

Загалом вважаю, що положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі, є обґрунтованими, науково аргументованими, належно верифікованими та повною мірою відповідають обсягу виконаного дослідження.

3. Оцінка практичного значення результатів роботи.

Отримані результати та рекомендації, представлені у дисертації, є практично значущими та доцільними для впровадження у процеси розробки мікрофлюїдних пристроїв з функцією сортування мікрочастинок. Зокрема, запропонований алгоритм автоматизованого підбору параметрів акустичного впливу на основі машинного навчання може бути інтегрований у пакети чи системи автоматизованого проєктування, що використовуються в біомедичній інженерії та мікросистемній техніці.

Цінним є те, що результати дисертаційної роботи використовуються в навчальних процесах у Національному університеті „Львівська політехніка” та у ВСП „Фаховий коледж інформаційних технологій НУ „Львівська політехніка”, а також в інженерно-технологічних роботах зі створення обладнання для сепарації

у ТЗОВ «АПДЕЙТ ТЕХНОЛОДЖІС СИСТЕМЗ», що підтверджено відповідними актами.

4. Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання академічної доброчесності.

Дисертаційна робота присвячена створенню методів і моделей автоматизованого проектування акустофлюїдних мікросистем, які за рахунок формування стоячих акустичних хвиль у мікроканалах забезпечують селективне керування траєкторією руху нерозчинних мікрочастинок. За своїм змістом робота цілковито відповідає стандарту вищої освіти зі спеціальності 122 «Комп'ютерні науки». Дисертація є завершеною дослідницькою роботою, має чітку структуру та складається зі вступу, чотирьох змістовних розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У першому розділі здійснено ґрунтовний аналіз фізичних принципів, що лежать в основі акустофлюїдного розділення мікрочастинок, зокрема – первинних і вторинних сил акустичного випромінювання, які впливають на переміщення частинок у рідинному середовищі. Обґрунтовано доцільність використання поверхневих акустичних хвиль, здійснено критичний аналіз впливу геометричних параметрів ЗШП на ефективність формування стоячої хвилі. Визначено, що із-за мультифізичності потоків в мікроканалах лаб-чипів, проектування процесів розділення мікрочастинок вимагає детального чисельного моделювання. Акцентовано на перспективності використання методів штучного інтелекту для автоматизації й оптимізації конструктивно-технологічних параметрів рідинних мікросистем.

Другий розділ присвячено моделюванню роботи ЗШП, визначенню їх конструктивних характеристик і вивченню їх впливу на формування поверхневих акустичних хвиль. Автором здійснено побудову 2D та 3D моделей у середовищі COMSOL Multiphysics®, розроблено математичні моделі для опису поширення акустичних хвиль у мікроканалі та дії акустофоретичних сил на зважені мікрочастки. Показано залежність ефективності роботи пристрою від геометрії електродів, матеріалу п'єзоелектричної підкладки, кількості пальців ЗШП та

інших параметрів. Результати чисельного моделювання дозволили обґрунтувати оптимальні конструктивні варіанти ЗШП.

У третьому розділі наведено побудову повнофункціональної математичної моделі процесу акустофоретичного розділення частинок з урахуванням основних фізичних явищ: поширення акустичних хвиль, в'язкої течії рідини та взаємодії рідина-частинка. Модель дала змогу проаналізувати рух мікрочастинок різної густини й розміру, а також продемонструвала ефективність фокусування частинок на прикладі мікропластику, сажі та золи. Виконано повний цикл моделювання - від створення конструкції до оцінки результатів сортування. Значним досягненням є побудова двох прототипів акустофлюїдних лаб-чипів з можливістю високоточного сортування часточок за їх фізичними параметрами. Представлено опис процесу виготовлення фізичного прототипу із застосуванням лазерного фрезерування та трафаретного нанесення електродів.

У четвертому розділі обґрунтовано та реалізовано підхід до автоматизації процесу проектування акустофлюїдних пристроїв із використанням алгоритмів машинного навчання з підкріпленням. Продемонстровано, що використання методів машинного навчання дає змогу ефективно підбирати параметри, зокрема частоту акустичних хвиль та швидкість потоку рідини, з урахуванням невдалих реалізацій. Навчання алгоритму базується на результатах чисельних експериментів та створеному наборі даних. Зазначений підхід сприяє підвищенню точності сортування, оптимізації витрат часу і ресурсів, а також уніфікації процесу проектування різноманітних лаб-чипів.

Висновки містять основні результати, які узгоджуються з сформульованою на початку роботи метою та поставленими завданнями дисертаційного дослідження.

У дисертаційній роботі та наукових публікаціях Стахів В.М. представлено результати самостійних досліджень автора, матеріали не містять елементів фальсифікації, плагіату чи запозичень, що підтверджує відсутність порушень академічної доброчесності.

5. Мова та стиль викладення результатів.

Текст дисертаційної роботи написано українською мовою, включає всі потрібні структурні елементи та відповідає вимогам до наукових робіт в Україні. Мова та

стиль викладення і оформлення результатів дисертаційної роботи відповідають академічним стандартам. Виклад інформації у дисертації є послідовним, логічним та цілісним. Структура і зміст дисертації відповідають темі і завданням роботи. Усі терміни та поняття використовуються коректно і відповідають їх визначенням у науковій літературі. Графічні й табличні матеріали, представлені у роботі, є такими, що допомагають краще зрозуміти хід роботи та отримані результати і висновки.

6. Повнота викладення наукових результатів в опублікованих працях.

Основні положення дослідження оприлюднені в 14 наукових публікаціях, серед яких 5 статей у фахових виданнях України, 1 – у міжнародному виданні, 3 – у виданнях, індексованих у наукометричних базах, що свідчить про визнання результатів науковою спільнотою.

В цілому опубліковані праці відображають повноту викладу результатів дисертаційної роботи. Науковий рівень публікацій – високий. Загалом, кількість публікацій, їх повнота та обсяг у достатній мірі відображають особистий внесок автора і відповідають вимогам, що висуваються до дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

7. Зауваження та дискусійні положення щодо дисертаційної роботи.

Дисертація загалом не викликає суттєвих зауважень, однак слід зазначити кілька аспектів, що можуть бути враховані у подальшій науковій роботі здобувача:

1. Більше уваги слід було приділити порівнянню розробленої моделі з існуючими комерційними або експериментальними рішеннями в галузі акустофлюїдики.

2. Було б доцільно розширити розділ, присвячений обґрунтуванню вибору параметрів машинного навчання, зокрема, - аналізу гіперпараметрів і впливу їх на результати.

3. В роботі у 3-му розділі задекларовано новий метод розділення мікрочасточок – за часом, однак немає деталізації цього методу та не наведено

залежності часу розділення від різних розмірів мікрочасточок, яка необхідна для інженерів-проектувальників акустофлюїдних лаб-чипів.

4. У роботі використовується поняття «ефективність розділення», «ефективність сортування», «ефективність функціонування», однак ніде немає визначення чи пояснення цих понять.

5. Більшість моделей і обчислювальних експериментів в дисертаційній роботі проводились на 2D моделях, хоча 3D моделі можуть значно точніше описати переміщення мікрочасточок в рідинних мікроканалах.

6. У висновку до розділу 4 вказано, що дисертантом розроблено рекомендаційну систему на основі машинного навчання з підкріпленням. Однак не зрозуміло, де реалізована ця рекомендаційна система, не представлено її інтерфейс, не описано як рекомендаційна система працює з COMSOL.

7. В роботі вказано, що однією з основних переваг акустофлюїдних пристроїв є можливість сортування біологічних часточок, однак не наведено жодного натурного чи модельного обчислювального експерименту сортування живих біо-часток.

8. В роботі зустрічаються деякі граматичні та семантичні помилки (стор. 58, 120, 160), декілька рисунків в роботі виконано англійською мовою (напр., рис. 3.3, рис. 3.4, рис. 3.6).

Зазначені зауваження не знижують наукової цінності дисертаційної роботи, мають рекомендаційний характер і не впливають в цілому на отримані результати та зроблені висновки.

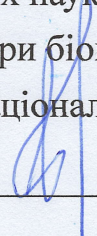
8. Загальний висновок.

Дисертаційна робота Стахіва В.М. є завершеним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальну наукову задачу розроблення методів та моделей для автоматизованого проектування акустофлюїдних мікросистем призначених для розділення зважених нерозчинних мікрочастинок. Робота має важливе теоретичне і прикладне значення для біохімічних та біомедичних застосувань. Робота не містить порушень академічної доброчесності, а отримані результати висвітлено у достатній кількості наукових публікацій та апробовано на наукових конференціях.

Дисертаційна робота Стахіва Володимира Михайловича «Методи та моделі для автоматизованого проектування акустофлюїдних мікроелектромеханічних систем» відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженому Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її автор Стахів Володимир Михайлович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки», галузь знань – 12 «Інформаційні технології».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук., професор,
професор кафедри біомедичної інженерії
Харківського національного університету радіоелектроніки

 Ігор ПРАСОЛ 16.07.2025р.

Підпис д.т.н., проф. Прасола І.В. засвідчую:

Учений секретар
Харківського національного університету радіоелектроніки
кандидат технічних наук, доцент



 Ірина ЖАРІКОВА