

ВІДГУК

офіційного опонента **Матуса Валерія Володимировича**

на дисертаційну роботу **Стахіва Володимира Михайловича**

«Методи та моделі для автоматизованого проектування акустофлюїдних мікроелектромеханічних систем»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії

в галузі 12 – Інформаційні технології

за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки

Актуальність обраної теми дослідження та її зв'язок із науковими програмами, планами, темами

Моделі маніпулювання мікрочастинками у рідинних середовищах стосуються важливих завдань сучасної інженерії, екології, біології, медицини, фармакології, пов'язаних із проектуванням та застосуванням рідинних мікроелектромеханічних систем. Невід'ємним елементом при цьому є вибір фізичного явища, завдяки якому відбувається керування рідинними системами. Такі традиційні методи розділення мікрочастинок, як фільтрація, центрифугування, фракціонування, імуномагнітна ізоляція мають суттєві обмеження щодо швидкодії та можливого пошкодження біологічних об'єктів. Акустофлюїдні технології дозволяють подолати ці обмеження, однак їх проектування є складною міждисциплінарною задачею. Впровадження методів машинного навчання та штучного інтелекту в процес проектування акустофлюїдних систем дозволяє значно підвищити точність та оперативність рішень. Завдяки інтеграції інтелектуальних алгоритмів аналізу даних можливо скоротити час виявлення експлуатаційних дефектів та мінімізувати ризик виникнення аварійних ситуацій. Дисертаційна робота обумовлена необхідністю забезпечення ефективного акустичного маніпулювання мікрочастинками в сучасних біомедичних, екологічних та технологічних застосуваннях і стосується комплексного дослідження у даному напрямку з використанням сучасних комп'ютерних технологій, що засвідчує її актуальність.

Обрана тема має тісний зв'язок із державними та міжнародними науковими програмами й стратегіями розвитку мікроелектромеханічних систем. Зокрема, дисертаційна робота Стахіва В. М. виконана в рамках наукового напрямку

кафедри систем автоматизованого проектування Національного університету «Львівська політехніка».

Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі

Всі наукові положення, результати і висновки дисертаційної роботи достатньо повно обґрунтовані і вмотивовані. Математичні моделі, розроблені автором, ґрунтуються на класичних рівняннях термов'язкої акустики, рівняннях Нав'є-Стокса та законах збереження, що забезпечує їх фізичну адекватність. Достовірність результатів, отриманих із застосуванням цих моделей, забезпечується коректністю та строгістю математичних постановок задач, використанням апробованого програмного забезпечення COMSOL Multiphysics для мультифізичного моделювання, проведенням великого обсягу чисельних експериментів, застосуванням сучасних методів машинного навчання (TensorFlow, OpenCV) для валідації результатів, збігом отриманих результатів у окремих випадках із відомими у літературі.

Наукова новизна отриманих результатів

Під час виконання дисертаційної роботи здобувачем отримано низку нових вагомих результатів, серед яких можна виділити наступні:

- Удосконалено математичну модель акустичного поля в мікроканалі лаб-чипа, яка, на відміну від існуючих, комплексно враховує геометрію мікроканалу, конструкцію і топологію зустрічно-щтирьового перетворювача (ЗШП), характеристики п'єзоелектрика та мультифізичні ефекти. Це дозволило дослідити вплив конструктивних параметрів на формування стабільної стоячої акустичної хвилі.
- Розвинуто математичну модель процесу акустичного розділення мікрочастинок, яка включає три багатопараметричні фізичні процеси (ламінальний потік, термов'язка акустична хвиля, рух мікрочастинок) та враховує взаємодію "рідина-частинка".
- Побудовано оригінальні моделі універсальних акустофлюїдних Y- та Ψ -сепараторів, які забезпечують 100% ефективність розділення двох і трьох типів мікрочастинок відповідно.
- Вперше запропоновано підхід до інтелектуалізації проектування акусторідинних систем шляхом інтеграції COMSOL Multiphysics з алгоритмами машинного навчання з підкріпленням через Python та

LiveLink API. Це забезпечує автоматичний підбір оптимальних параметрів без участі проєктувальника.

З огляду на отриману наукову новизну дисертаційної роботи Стахіва В. М. можна стверджувати, що автором отримано вагомі результати, що мають наукове і практичне значення.

Практична значення отриманих результатів полягає у:

- Розробці конкретних конструкцій ЗШП з оптимізованими параметрами для різних п'єзоелектричних матеріалів (LiNbO_3 , PZT, ZnO).
- Створенні технології виготовлення акустофлюїдних лаб-чипів з використанням лазерної обробки та трафаретного друку.
- Виготовленні діючого прототипу лаб-чипа, адаптованого під платформу Micronit.
- Розробці програмної системи для автоматизованого підбору параметрів, що скорочує час проєктування з сотень годин до кількох хвилин.
- Впровадженні результатів у навчальний процес НУ "Львівська політехніка" та виробничу діяльність ТзОВ "АПДЕЙТ ТЕХНОЛОДЖІС СИСТЕМЗ".

Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях та їх відповідність встановленим вимогам

Основні положення та результати дисертаційної роботи Стахіва В. М. опубліковані у 14 наукових працях, з них: 5 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у закордонному фаховому періодичному виданні, 3 публікації у матеріалах конференцій, що індексуються в Scopus. Основні результати та положення дисертаційної роботи Стахіва В. М. апробовані на 7 наукових семінарах і конференціях.

Викладення наукових положень та рекомендацій дисертаційної роботи Стахіва В. М. є всебічним і відповідає встановленим вимогам, що підтверджується широкою базою публікацій у міжнародних наукометричних базах (Scopus) та апробацією на численних наукових семінарах і конференціях.

Оцінка відсутності/наявності академічного плагіату, фабрикації та фальсифікації у дисертаційній роботі

Дисертаційна робота Стахіва В. М. не містить ознак академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації відповідно до ст. 42 Закону України «Про освіту». Усі результати дисертаційної роботи Стахіва В. М. отримано автором

самостійно, а використання ідей, даних та текстів інших авторів завжди супроводжується відповідними посиланнями на джерела.

Оцінка змісту, структури та завершеності дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Стахіва В. М. має класичну структуру, викладена на 192 сторінках друкованого тексту (із них 175 сторінок основного тексту), а саме: анотація, вступ, чотири розділи з відповідними підрозділами, висновки до кожного розділу, загальні висновки, список використаних джерел і додатки.

У **вступі** подано загальний опис роботи, викладено обґрунтування актуальності обраної теми дисертації, чітко визначено мету і ключові завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет та методологію дослідження. Розкрито наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, а також інформацію про апробацію результатів і їхнє висвітлення у наукових публікаціях. Okремо зазначено особистий внесок здобувача у роботах із співавторами.

Перший розділ містить ґрунтовний аналіз сучасного стану акустофлюїдних технологій. Автор систематизував механізми акустофоретичного розділення мікрочастинок, проаналізував конструкції ЗШП та обґрунтував доцільність застосування машинного навчання.

У **другому розділі** автор описує власні методики математичного моделювання та оптимізації процесів в акустофлюїдних системах. Подано алгоритми дослідження акустичного тиску в мікроканалах, а також наведено результати їх реалізації з використанням програмного середовища COMSOL Multiphysics. Особливо цінними є результати дослідження впливу різних конфігурацій ЗШП (базова, зі спареними пальцями, з різною шириною пальців) на стабільність акустичного поля.

Третій розділ демонструє практичну реалізацію розроблених моделей для розділення реальних об'єктів. Подано методику аналізу руху мікрочастинок у мікроканалі та досліджено вплив його геометрії на ефективність розділення частинок. Особливо детально описано моделювання процесів розділення мікропластику, сажі та золи з урахуванням їх фізичних властивостей.

Четвертий розділ є інноваційним з точки зору інтеграції САПР та штучного інтелекту. Автор успішно реалізував концепцію "розумного" проектування, де система самостійно визначає оптимальні вхідні параметри. Поєднання мультифізичного моделювання у COMSOL Multiphysics із

алгоритмами оптимізації та класифікації відкриває нові можливості для автоматизації й пришвидшення процесу розробки мікрофлюїдних пристроїв.

Робота завершена чіткими та аргументованими висновками, що узагальнюють наукові результати та підкреслюють перспективи подальших досліджень.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. У роботі для опису акустичного поля часто використовується двовимірна модель. Чи не призводить таке спрощення до втрати частини важливої інформації про 3D-ефекти, зокрема, взаємодії між вертикальними та горизонтальними компонентами акустичних сил?

2. У роботі не зазначено, чи проводилась експериментальна перевірка точності отриманих числових моделей. Чи планується верифікація за допомогою реального прототипу?

3. У розрахунках приймається синусоїдальний сигнал з ідеальною формою. Чи досліджувався вплив високочастотних гармонік або шумів на розподіл акустичного поля?

4. Модель орієнтована на опис дії акустофоретичних сил, проте не розглядається взаємодія цих сил із гідродинамічним профілем потоку (параболічний профіль, в'язкість, градієнт швидкості). Якою мірою ці фактори можуть спотворювати або посилювати сортування частинок?

Разом з тим, подані зауваження не знижують загального позитивного враження про дисертаційну роботу Стахіва В. М.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Стахіва В. М. за темою «Методи та моделі для автоматизованого проектування акустофлюїдних мікроелектромеханічних систем» за змістом відповідає стандарту вищої освіти третього рівня за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки», є завершеною науковою працею, виконаною автором самостійно. Положення дисертаційної роботи Стахіва В. М. містять наукову новизну та мають практичну цінність. На підставі проведених досліджень отримано наукові результати, що є суттєвим авторським внеском у вирішення актуального науково-прикладного завдання – розроблення методів і моделей для автоматизованого проектування акустофлюїдних мікросистем, що використовуються для вибіркового керування рухом різнорідних нерозчинних мікрочастинок

Вважаю, що дисертаційна робота Стахіва В. М. за темою «Методи та моделі для автоматизованого проектування акустофлюїдних мікроелектромеханічних систем» відповідає вимогам до оформлення дисертацій, затверджених наказом МОН України № 40 від 12.01.2017 р. та пунктам 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 № 44, а її автор Стахів Володимир Михайлович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Офіційний опонент,
завідувач відділу обчислюваної механіки деформівних систем
Інституту прикладних проблем механіки і математики
ім. Я. С. Підстригача НАН України,
доктор фіз.-мат. наук,
старший науковий співробітник



Валерій МАТУС

