

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Караєва Артема Олександровича

«Ефективні методи аналізу аксіально-симетричних крайових задач теорії

потенціалу та теорії пружності»,

яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

з галузі знань 10 – Природничі науки

за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

1. Оцінка роботи здобувача у процесі підготовки дисертації і виконання індивідуального плану навчальної та наукової роботи.

Аспірант Караєв Артем Олександрович виконав у повному обсязі Індивідуальний план виконання освітньо-наукової програми підготовки доктора філософії. Освітня програма в обсязі 40 кредитів ECTS виконана у повному об'ємі. Він успішно склав наступні дисципліни:

- залік з навчальної дисципліни «Філософські засади та методологія наукових досліджень» (95 бали);
- залік з навчальної дисципліни «Підготовка наукових публікацій та презентація результатів досліджень» (93 бали);
- залік з навчальної дисципліни «Інформаційні технології у прикладній фізиці» (95 балів);
- іспит з навчальної дисципліни «Іноземна мова для аспірантів» (94 бали);
- іспит з навчальної дисципліни «Актуальні проблеми сучасної прикладної фізики та наноматеріалів» (95 балів);
- іспит з навчальної дисципліни «Новітні технології обробки даних у фізиці» (95 балів).

Всі заплановані види робіт були виконані своєчасно. Здобувач плідно співпрацював з науковими керівниками протягом усього терміну навчання в аспірантурі.

2. Обґрунтування вибору теми дослідження.

Значна кількість сучасного технічного обладнання при проектуванні вимагає кваліфікованих обчислень характеристик фізичних та механічних полів, що забезпечують високу надійність, міцність, стійкість руху елементів обладнання, що розглядаються. Хоча лише натурний експеримент дає змогу підтвердити або спростувати теоретичні моделі фізичних явищ, проведення таких експериментів в багатьох випадках є коштовною та не завжди безпечною процедурою. Тому головним в сучасних наукових дослідженнях стають віртуальні, або комп'ютерні експерименти, що дають змогу отримати необхідні фізичні характеристики шляхом проведення числових розрахунків. Для проведення розрахунків фізичних полів використовують математичні моделі у вигляді диференціальних рівнянь та їх систем із заданими початковими та граничними умовами. На теперішній час розроблено ефективні методи числового розв'язання диференціальних рівнянь в часткових похідних. Але більшість методів зорієнтовано на використання дискретних аналогів диференціальних рівнянь, що для забезпечення прийнятної точності потребує використання систем великої розмірності. Збільшення розмірності розв'язувальних систем призводить, у свою чергу, до втрати стійкості розрахункових схем та суттєвого збільшення розрахункового часу.

Слід зауважити, що існує багато математичних моделей для розрахунку фізичних полів, які засновані на використанні диференціальних рівнянь еліптичного типу. К таким формулюванням приводять задачі вивчення руху рідини в резервуарах, визначення статичних та динамічних характеристик пружного тіла, задачі електростатики та ін. Однією з важливих науково-технічних проблем в галузі ракетно-космічної техніки є забезпечення стійкості ракет-носіїв на різних етапах польоту, включаючи маневри при низьких рівнях гравітації. Вказані задачі можна розв'язувати з використанням теорії потенціалу з подальшим зведенням до сингулярних інтегральних рівнянь. Це дає значні переваги у порівнянні з методами, що використовують різного роду

сітки, які охоплюють розрахункову область в цілому, оскільки використання вказаних сингулярних інтегральних рівнянь потребує лише дискретизації межі розрахункової області. Але труднощі виникають при числовому аналізі, що пов'язано з наявністю особливостей різного типу в досліджуваних інтегралах.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення сучасного ефективного обчислювального методу для аналізу крайових задач теорії потенціалу та теорії пружності з урахуванням аксіальної симетрії.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були сформульовані та розв'язані такі основні наукові та прикладні задачі:

1. Розробити математичні моделі для аналізу міцносних та динамічних характеристик оболонок та оболонкових конструкцій, що частково заповнені рідиною.

2. Обґрунтувати доцільність зведення задач гідро-пружної взаємодії до граничних інтегральних рівнянь.

3. Побудувати математичні моделі для дослідження вільних коливань рідини в жорстких резервуарах за різні рівні заповнення, різні рівні гравітаційного поля.

4. Керуючись тим, що крайові задачі теорії потенціалу та теорії пружності, мають багато спільних рис, розробити уніфіковані ефективні методи для обчислення елементів матриць, що мають особливості різного типу, та є придатними для використання як в задачах теорії потенціалу, так і в задачах теорії пружності

5. Удосконалити метод сингулярних елементів

6. Розробити математичні моделі, що дозволяють враховувати як класичні, так і некласичні граничні умови на поверхнях взаємодії середовищ.

7. Розробити нову математичну модель для вивчення гравітаційно-капілярних хвиль.

8. На основі методу граничних елементів розробити математичну модель просторового репрезентативного елемента для вивчення осереднених

механічних властивостей композитів та нанокompозитів, з врахуванням класичних та некласичних умов на поверхнях взаємодії матеріалів матриці та включення.

9. Провести тестування розроблених методів та алгоритмів з метою доведення достовірності запропонованих підходів.

10. Провести числове дослідження задачі електростатики.

11. Здійснити числові дослідження частот та форм коливань рідини в складених баках різної форми, провести порівняння результатів, отриманих з урахуванням та без урахування поверхневого натягу.

12. Дослідити коливання рідини в коаксіальних та тороїдальних оболонках, частково заповнених рідиною. Вивчити залежності динамічних характеристик від геометричних параметрів оболонок.

13. Провести числове дослідження осереднених механічних характеристик репрезентативної об'ємної комірки у вигляді циліндру із включенням у вигляді закругленого циліндру.

Об'єкт та предмет дослідження.

Об'єкт дослідження – фізико-механічні поля, що виникають в аксіально-симетричних задачах теорії потенціалу та лінійної теорії пружності.

Предмет дослідження – міцнісні та динамічні характеристики оболонок обертання, частково заповнених рідиною, та осереднені міцності характеристики об'ємних репрезентативних комірок композитів.

Методи дослідження.

1. Модифіковані обчислювальні методи граничних елементів та їх поєднання, метод Фур'є.

3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна відповідно до плану науково-дослідних робіт навчально-наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики, зокрема, в межах науково-дослідної роботи № держреєстрації 0122U001482, тема

наукового дослідження «Математичне моделювання теплових процесів в анізотропних наноматеріалах», при виконанні якої здобувач приймав участь як виконавець.

4. Особистий внесок дисертанта в отриманні наукових результатів та їх новизна.

Автором особисто виконано наступні види робіт:

1. Побудовано коректні та точні алгоритми числового моделювання задач прикладної фізики у напрямках гідродинаміки, електродинаміки та теорії пружності;

2. Запропоновано новий клас спеціальних функцій пов'язаних з узагальненими еліптичними інтегралами, досліджено їх властивості, отримані рекурентні формули та розроблено ефективний числовий метод для розрахунку побудованих спеціальних функцій

3. Створено математичний апарат для коректного обчислення сингулярних інтегралів матриць теорії потенціалу та теорії пружності (задач з еліптичним диференціальним оператором);

4. Побудовані математичні моделі для дослідження вільних коливань рідини в жорстких резервуарах за різні рівні заповнення, різні рівні гравітаційного поля, у тому числі при малих рівнях гравітації;

5. Удосконалено метод сингулярних елементів;

6. Розроблено нову математичну модель для вивчення гравітаційно-капілярних хвиль;

7. Розроблено математичну модель просторового репрезентативного елемента для вивчення осереднених механічних властивостей композитів та нанокомпозитів, з врахуванням класичних та неklasичних умов на поверхнях взаємодії матеріалів матриці та включення на основі методу граничних елементів;

8. Проведено числове дослідження задачі електростатики з використанням розроблених числових методів.

9. Досліджені коливання рідини в коаксіальних та тороїдальних оболонках, частково заповнених рідиною.

10. Запропоновані математичні методи використано для аналізу та вирішення задач власних коливань палива у резервуарах з рідиною з наявною аксіальною симетрією у полі сили тяжіння із впливом капілярних ефектів.

5. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів, одержаних Караєвим А.О., при проведенні досліджень за темою дисертаційної роботи, забезпечується використанням фундаментальних підходів і методів обчислювальної і математичної фізики. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані в індексованих наукових журналах та доповідалися на міжнародних наукових конференціях. Висновки дисертаційної роботи є обґрунтованими.

6. Наукове, теоретичне та практичне значення результатів дисертації.

1. Розроблено новий ефективний метод розв'язання крайових задач теорії потенціалу та лінійній теорії пружності, заснований на використанні редукованого методу граничних елементів.

2. Запропоновано новий клас спеціальних функцій пов'язаних з узагальненими еліптичними інтегралами, досліджено їх властивості та розроблено числовий метод для їх розрахунку.

3. Запропоновано нові математичні моделі для врахування неklasичних граничних умов на поверхнях інтерфейсу для розв'язання аксіально-симетричних задач теорії пружності та динаміки коливань рідини в резервуарах при малих рівнях гравітації

4. Вперше, на основі методу граничних елементів з аксіальною симетрією розроблено математичну модель просторового репрезентативного

елементу для вивчення осереднених механічних властивостей композитів та нанокомпозитів, з врахуванням класичних та некласичних умов на поверхнях взаємодії матеріалів матриці та включення.

5. Здійснено уточнені числові дослідження частот та форм коливань рідини в складених баках різної форми з порівнянням результатів, отриманих з урахуванням та без урахування поверхневого натягу.

6. Проведено уточнене дослідження коливань рідини в коаксіальних та тороїдальних оболонках, частково заповнених рідиною та знайдено залежності динамічних характеристик від геометричних параметрів оболонок.

7. На основі модифікованого методу граничних елементів з аксіальною симетрією проведено числове дослідження осереднених механічних характеристик репрезентативної об'ємної комірки у вигляді циліндру із включенням у вигляді закругленого циліндру.

8. Вперше побудовано математичну модель для опису гравітаційно-капілярних хвиль.

7. Повнота викладення матеріалів дисертації в роботах, опублікованих автором.

Матеріали дисертаційної роботи опубліковано в **8** наукових працях, серед яких **8** публікації у міжнародних виданнях, які входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science, **5** тез доповідей.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Публікації у наукових фахових виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз Scopus або Web of Science:

1. V Gnitko, K Degtyariv, A Karaiev, E Strelnikova. Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity. WIT Transactions on Engineering Sciences. 2019/1/30; 122: 13-25. (Scopus, United Kingdom, Q4)

(Особистий внесок здобувача: побудував математичну модель задачі теорії пружності твердих тіл за наявності мікро- та нано-включень;

побудував числовий алгоритм знаходження власних частот коливань сферично-циліндричних резервуарів із рідиною)

2. V Gnitko, K Degtyariov, A Karaiev, E Strelnikova. Singular boundary method in a free vibration analysis of compound liquid-filled shells. WIT Transactions on Engineering Sciences. 2019/9/13; 126: 189-200. (Scopus, United Kingdom, Q4)

(Особистий внесок здобувача: побудував математичну модель задачі коливань нев'язкої рідини в циліндричних резервуарах різних типів: циліндрично-сферичних, циліндрично-конічних тощо; застосував швидкий алгоритм методу сингулярних границь до розв'язання задачі власних функцій та власних частот вільних коливань рідини; створив квадратурні формули для обчислення сингулярних інтегралів, що виникають при розв'язанні системи лінійних рівнянь у задачах теорії потенціалу)

3. Artem Karaiev, Elena Strelnikova. Singular integrals in axisymmetric problems of elastostatics. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing. 2020/2/20; 11(01): 2050003. (Scopus, Singapore, Q3)
(Особистий внесок здобувача: дослідив та обчислив квадратурні формули для розв'язання сингулярних інтегралів, що виникають при розв'язанні системи лінійних алгебраїчних рівнянь для знаходження невідомих поверхневих сил та деформації твердих тіл у задачах теорії пружності)

4. Artem Karaiev, Elena Strelnikova. Liquid Sloshing in Circular Toroidal and Coaxial Cylindrical Shells. Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50491-5_1: 3-13. (Scopus, Germany, Q4)
(Особистий внесок здобувача: побудував математичну модель коливань рідини в тороїдальних та коаксіальних циліндричних оболонках, зокрема розглянув та аналітично дослідив резонансні частоти коливань при малих радіусах тороїдальних оболонок; розробив числовий алгоритм знаходження власних частот та власних функцій коливань рідини в тороїдальних оболонках)

5. Vasyl I Gnitko, Artem O Karaiev, Maria L Myronenko, Elena A Strelnikova. BEM analysis of gravitational–capillarity waves on free surfaces of

compound shells of revolution. International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements. 2021/3/4; 9(1): 38-50. (Scopus, United Kingdom, Q4)

(Особистий внесок здобувача: побудував математичну модель коливань рідини в циліндричних резервуарах за наявності впливу сил поверхневого натягу рідини та гравітаційного поля; розробив метод розділення задачі коливань рідини на виключно гравітаційну задачу та знайшов методом збурень розв'язок загальної гравітаційно-капілярної задачі, знаючи значення власних функцій виключно гравітаційної задачі)

6. Artem Karaiev, Elena Strelnikova. Axisymmetric polyharmonic spline approximation in the dual reciprocity method. ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 2021/4; 101(4): e201800339. (Scopus, Germany, Q2)

(Особистий внесок здобувача: отримав новий клас спеціальних функцій, названих спеціальними еліптичними інтегралами, що узагальнюють відомі класичні повні еліптичні інтеграли; отримав рекурентні формули, що дозволяють обчислити з будь-якою заданою точністю спеціальні еліптичні інтеграли будь-якого порядку; використав отримані формули для числового розв'язання задач знаходження електричного потенціалу заряджених тіл та задач термoplastичності)

7. Vasyl I Gnitko, Artem O Karaiev, Neelam Choudhary, Elena A Strelnikova. Boundary element method analysis of boundary value problems with periodic boundary conditions. WIT Transactions on Engineering Sciences. 2021/8/24; 131: 31-44. (Scopus, United Kingdom, Q4)

(Особистий внесок здобувача: побудував математичну модель задачі коливань рідини в циліндричних резервуарах з періодичними граничними умовами; використав отримані вище спеціальні еліптичні інтеграли для розв'язання сингулярних інтегралів, що породжені розгляданням періодичних функцій в ряди)

8. Vasyl I Gnitko, Artem O Karaiev, Kyryl G Degtyariov, Ivan A Vierushkin, Elena A Strelnikova. Singular and hypersingular integral equations in fluid-structure interaction analysis. WIT Transactions on Engineering Sciences. 2022/7/25; 134: 67-79. (Scopus, United Kingdom, Q4)

1. *(Особистий внесок здобувача: розробив квадратурні формули для розв'язання сингулярних інтегралів з логарифмічною особливістю; використав*

отримані формули для числового аналізу коливань рідини в пружних резервуарах)

Результати дисертаційної роботи повністю відображено в публікаціях.

8. Дотримання академічної доброчесності.

На підставі вивчення тексту дисертації здобувача, наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет-системі Strikeplagiarism.com) встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності.

9. Апробація матеріалів дисертації.

Основні результати роботи доповідались і обговорювались на:

1. Міжнародній конференції «Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях (КМНТ-2018)», Харків;
 2. XIX Міжнародному симпозиумі «Методи дискретних особливостей в задачах математичної фізики», 2019, Харків;
 3. Міжнародній науково-технічній конференції «Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення 2019» (ФТПЕШВ-2019);
 4. 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE 2020; Kharkiv; Ukraine.
1. 3rd International Black Sea Modern Scientific Research Congress; 2023 - Samsun, Turkiye.

10. Оцінка структури, мови та стилю дисертації.

Матеріал дисертації викладено в логічній послідовності та доступно для сприйняття. Дисертація написана науковим стилем мовлення, структура дисертації відповідає алгоритму здійсненого автором дослідження. Зміст, структура, оформлення дисертації та кількість публікацій відповідають

вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44), наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

11. Відповідність змісту дисертації спеціальності, за якою вона подається до захисту.

За своїм фаховим спрямуванням, науковою новизною і практичною значимістю дисертаційна робота Каражва А.О. «Ефективні методи аналізу аксіально-симетричних крайових задач теорії потенціалу та теорії пружності» повністю відповідає паспорту спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали». Здобувачем повністю виконано освітню та наукову складову третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти.

12. Результати обговорення та проведення презентації. Рекомендація дисертації до захисту.

Здобувач представив основні результати своєї дисертаційної роботи на розширеному засіданні кафедри інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах навчально-наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна щодо попередньої експертизи дисертації (Витяг з протоколу № 4-1/23 розширеного засідання кафедри інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах від 20 квітня 2023 р.) у формі презентації та наукової дискусії після її завершення. На даному засіданні були присутні 9 співробітників із різних наукових та навчальних установ України, із яких 5 докторів наук, 3 кандидатів наук та 1 доктор філософії. Дисертанту було задано 6 запитань, на які він надав вичерпні відповіді. Також виступили 5 науковців, які позитивно відізначались про дисертаційне дослідження Караєва А.О..

У рамках цього розширеного засідання було ухвалено одноголосно (9 голосів) рекомендувати дисертаційну роботу аспіранта Караєва Артема Олександровича «Ефективні методи аналізу аксіально-симетричних крайових задач теорії потенціалу та теорії пружності» повністю відповідає паспорту спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали» до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

Кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерної фізики



Деніс ЛІСІН