Голові разової спеціалізованої
вченої ради ДФ 64.052.004
Харківського національного
університету радіоелектроніки
доктору фіз.-мат. наук, проф.
Максиму СИДОРОВУ

Рецензія

рецензента, Матвієнко Ольги Іванівни, кандидата технічних наук, доцента,
доцента кафедри прикладної математики
Харківського національного університету радіоелектроніки
Міністерства освіти і науки України
на дисертацію Крютченка Дениса Володимировича
«*Уточнені математичні моделі для дослідження вільних
та вимушених коливань рідини в резервуарах*»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
з галузі знань 11 Математика та статистика
за спеціальністю 113 Прикладна математика

1. Актуальність та обґрунтування вибору теми дослідження.

Предметом дослідження обрано міцнісні та динамічні характеристики оболонок, частково заповнених рідиною. Оболонки та оболонкові конструкції, що мають порожнини, частково заповнені рідиною, широко застосовуються в сучасній промисловості. Серед них – паливні баки і контейнери, які використовуються в різних областях, таких як аерокосмічна, нафтогазова промисловість, енергетичне машинобудування і транспорт. Найчастіше такі резервуари працюють за підвищених експлуатаційних навантажень та можуть бути заповнені агресивними або легкозаймистими рідинами. При інтенсивних силових впливах, раптово прикладеному навантаженні в резервуарах, що частково заповнені рідиною, спостерігається явище

плескання. Плескання рідини – це цікаве фізичне явище, яке набуває величезного практичного значення в широкому спектрі сучасних технологій і яке треба враховувати в межах багатьох технічних дисциплін та прикладних проблем. Це явище спостерігається в рухомих резервуарах, що містять рідину, таких як паливні баки ракет, баки, що застосовуються в морському і космічному транспорті, в сховищах, греблях, які перебувають під сейсмічним впливом, а також в реакторах і атомних судах. Також баки для зберігання рідини є важливими складовими рятувальних і промислових об'єктів. Наземні циліндричні цистерни використовуються для зберігання різноманітних рідин – води для пиття та гасіння пожеж, нафти, вина, зрідженого природного газу тощо. Пошкодження цистерн після руйнівних землетрусів може призвести, зокрема, до екологічної небезпеки, втрати цінного вмісту, пожеж. Неадекватно спроєктовані цистерни завдали великої шкоди та призвели до катастрофічних наслідків при руйнуванні під час землетрусів, що стались в минулому.

Таким чином, актуальним питанням є розробка нових ефективних комп'ютерних технологій для проведення моделювання фізичних явищ у вищезгаданих системах та структурах на основі комп'ютерного експерименту. Це вимагає створення нових числових схем та обчислювальних методів. Сучасний стан розвитку комп'ютерної техніки дозволяє досліджувати складні механічні системи та знаходити характеристики фізичних полів різної природи з використанням удосконалених математичних формулювань. З цього можна зробити висновок про актуальність теми дисертації.

2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому, стилю викладення результатів і оформлення.

Дисертація має наступну структуру: вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел та три додатки.

У першому розділі виконано аналіз наукової літератури, де розглянуті питання, пов'язані з методами розрахунку міцності та динамічного

стану оболонкових конструкцій, які мають відсіки, наповнені частково рідиною.

Другий розділ присвячений задачам, які стосуються вільних та вимушених коливань аксіально-симетричних та неаксіально-симетричних оболонок, що містять рідину. У цьому розділі розроблені математичні моделі для аналізу міцності та динамічних характеристик оболонок та оболонкових конструкцій, які частково наповнені рідиною, та мають перегородки різних типів (вертикальні та горизонтальні) для демпфування плескань. Також обґрунтовано необхідність зведення задач гідропружної взаємодії до граничних інтегральних рівнянь та редукції двовимірних систем до одновимірних.

Третій розділ присвячений власним коливанням рідини в жорстких резервуарах. Тут розглянуті математичні моделі для дослідження вільних коливань рідини в резервуарах. Для побудови дискретних моделей використані методи відокремлення змінних, методи граничних елементів та граничних суперелементів.

У четвертому розділі розроблено метод оцінки вібрації рідини в призматичних та циліндричних резервуарах під дією періодичних горизонтальних і вертикальних навантажень. Це дозволило зробити висновок, що найбільш небезпечні коливання рідини виникають, коли частота горизонтального збудження співпадає з власною частотою коливань рідини, а частота вертикального збудження дорівнює подвійному значенню власної частоти. Встановлено, що для досить тонких оболонок (з відносною товщиною менше ніж 0.0015) пружних стінок резервуара фундаментальна частота при зв’язаних коливаннях може бути набагато меншою, ніж частота рідини в оболонці з жорсткими стінками. Зі збільшенням товщини стінки резервуара цей ефект стає незначним, а нижча частота коливань оболонки з рідиною наближається до частоти коливань рідини в жорсткому резервуарі.

У п’ятому розділі досліджена пружність, стисливість та нелінійність руху рідини в оболонках. Тут розглянуто задачу на основі методу граничних

елементів та мультимодального підходу для числового аналізу ефектів нелінійного плескання в жорстких оболонках обертання при поздовжніх збудженнях. Використано слабке нелінійне формулювання з припущенням, що висота підйому вільної поверхні є малою порівняно з радіусом резервуару.

Дисертація є завершеною науковою працею, має чітку логічну структуру, написана сучасною науковою українською мовою, її оформлення відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 № 44) та «Вимогам до оформлення дисертації» (затверджено наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 № 40).

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

Дисертацію виконано на кафедрі прикладної математики Харківського національного університету радіоелектроніки та в рамках:

1) держбюджетної науково-дослідної теми № ДР 0111U001758 «Розробка наукових основ аналізу нестаціонарного динамічного напруженого стану елементів енергетичного та іншого обладнання з урахуванням пошкоджень»;

2) роботи для Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» за господарськими договорами № ДР 0114U101241 «Підвищення ефективності елементів конструкцій аерокосмічних систем при силових та аеродинамічних навантаженнях», № ДР 0120U101241 «Підвищення ефективності елементів конструкцій ракетно-космічної техніки шляхом їх чисельного моделювання та оптимізації» і № ДР 0117U00880 «Динамічна міцність елементів аерокосмічної та бронетанкової техніки під дією механічних навантажень»;

3) гранту Міністерства освіти і науки України «Сучасні обчислювальні методи для аналізу плескань в паливних баках з перегородками» в ра-

мках спільного українсько-індійського проєкту (2019–2021 рр.), у яких автор брав участь як виконавець.

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій у роботі забезпечена ефективним використанням методів граничних елементів та суперелементів. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів гарантується за допомогою наступних ключових підходів.

1. Використання відомих та апробованих підходів. У роботі використані відомі та перевірені методи для числового розв'язання диференціальних та інтегральних рівнянь. Це підвищує надійність та стабільність отриманих результатів, а також гарантує їхню відповідність відомим науковим стандартам.

2. Узгодженість результатів. Отримані результати виявляють високу ступінь узгодженості з аналітичними та числовими розв'язками, які вже розглядались іншими дослідниками. Ця узгодженість свідчить про вірогідність та адекватність використаних методів, а також підкреслює їхню здатність точно відтворювати реальні фізичні явища.

3. Апробація результатів. Наукові результати були представлені та обговорені на восьми міжнародних наукових конференціях. Це свідчить про важливість та визнання отриманих висновків у науковому середовищі, а також підтверджує їхню актуальність та інтерес до них з боку наукової спільноти.

5. Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна.

Дисертантом було отримано наступні нові наукові результати.

1. Розроблено ефективний редукований метод граничних елементів для розв'язування крайових задач теорії потенціалу. Також створено нові наближені методи числового розв'язування сингулярних інтегральних рів-

нянь, які враховують властивості ядер відповідних інтегральних операторів. Для підвищення точності була проведена перевірка точності побудованих квадратурних формул для інтегралів зі слабкою та особливою особливістю в сенсі Коші.

2. Вперше досліджено ефекти взаємного впливу пружності стінок та плескань рідини при вимушених коливаннях і знайдено умови, за яких частоти коливань стінок і рідини є близькими. Це відкриває нові можливості для розуміння поведінки систем з рідиною та стінками при динамічних навантаженнях.

3. Розглянуто метод граничних суперелементів для розв'язання задач про коливання рідини в оболонках з внутрішніми горизонтальними та вертикальними перегородками, які служать для гасіння плескань.

4. Надано уточнену оцінку частот вільних коливань рідини в жорстких циліндричних і циліндрично-конічних оболонках з урахуванням дії сили тяжіння.

5. Проведено уточнене дослідження комбінованих вертикально-горизонтальних навантажень з урахуванням пружних ефектів, що сприяє глибокому розумінню впливу різноманітних навантажень на системи з рідиною та стінками оболонок.

Основні наукові результати дисертації викладено у 28 наукових роботах: 20 статей, з яких 8 статей опубліковані у виданнях, зазначених в переліку наукових фахових видань України (категорія Б) за спеціальністю 113 Прикладна математика, 7 статей опубліковані у закордонних фахових наукових виданнях (з них 5 статей включено до міжнародної наукометричної бази Scopus), та 8 тез доповідей, опублікованих у матеріалах міжнародних наукових конференцій.

6. Практичне значення одержаних результатів.

Одержані в дисертації результати можуть бути використані під час проєктування елементів ракетної техніки, стаціонарних резервуарів для

зберігання пального, при відбудові елементів конструкцій, що містять рідину, від небажаних резонансних частот.

Ряд результатів та рекомендацій прикладних досліджень дисертаційної роботи використано в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України при виконанні спільного українсько-індійського проєкту «Сучасні обчислювальні методи для аналізу плескань в паливних баках» (відповідний акт впровадження міститься у додатку Б).

7. Дотримання академічної доброчесності.

За результатами аналізу дисертації та наукових публікацій Крютченка Д.В. порушення академічної доброчесності не виявлено. Елементи фальсифікації чи фабрикації тексту в роботі відсутні.

8. Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації.

Дисертація беззаперечно є дуже цікавою, спрямована на розв'язання вкрай цікавих прикладних задач науковою працею, але не позбавлена деяких недоліків. Серед недоліків слід відзначити наступне.

1. У циліндричній системі координат використовуються різні позначення для однієї з координат: $r\cos\theta$, $\rho\cos\theta$ (розділ 2, с. 61, і розділ 3, с. 82, відповідно).

2. Відсутність фізичного експерименту для розглянутих задач.

3. Хрестові перегородки досліджені лише в кубічних резервуарах і з тексту розділів 3, 4 не зрозуміло, чи можливе узагальнення підходу для призматичних резервуарів довільної геометрії?

4. У різних частинах роботи по різному написано вирази «циліндрико-конічна» та «циліндрично-конічна» оболонки.

5. Позначення потенціалів у вузлах поверхні S є невірним (розділ 2, с. 68), треба використовувати φ.

Проте, на мою думку, зроблені зауваження жодним чином не впливають на високу оцінку дисертації та наукової кваліфікації її автора.

9. Загальні висновки по дисертації.

Вважаю, що дисертація Крютченка Дениса Володимировича «Уточнені математичні моделі для дослідження вільних та вимушених коливань рідини в резервуарах», представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 11 Математика та статистика за спеціальністю 113 Прикладна математика, є актуальною, завершеною науковою працею, що виконана на належному науково-теоретичному рівні з логічно та доступно викладеним матеріалом.

В дисертації розв'язано важливу науково-технічну задачу, що полягає в розробленні сучасного й ефективного обчислювального методу для дослідження вільних та вимушених коливань рідини в резервуарах.

Здобувач Крютченко Денис Володимирович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 11 Математика та статистика за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Рецензент,
канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедри прикладної
математики Харківського
національного університету
радіоелектроніки МОН України Ольга МАТВІЄНКО

Підпис засвідчую.
Учений секретар Ігор МАГДАЛІНА