

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук,
професора **Сокол Галини Іванівни**
на дисертаційну роботу
Дрозденка Олександра Івановича

«Теоретичні основи розрахунків та фізико-технічні засади конструювання
електромеханічних приладів акустики пружних середовищ»
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за
спеціальністю 05.09.08 – Прикладна акустика та звукотехніка

1. Проблема, що вирішується у дисертації, та актуальність теми.

Суттєвою науково-технічною проблемою в технічній акустиці є створення електромеханічних приладів, що якісно працюють у пружних середовищах. Тому розв'язок цієї проблеми є актуальним завданням сьогодення. Дисертаційна робота присвячена вирішенню цієї проблеми. Автор досяг поставленої мети. Робота є цілісною та завершеною.

Серед приладів технічної акустики важливе місце займають п'єзокерамічні електроакустичні перетворювачі (ПЕП). Вони почали активно використовуватися у гідроакустиці протягом десятиріч у другій половині ХХ та першій половині ХХІ сторіч. Тому з точки зору часу ця галузь техніки досить молода. Враховуючи велику потребу у ПЕП у морському флоті, слід констатувати, що проектуванню і конструюванню п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів особливо в режимі випромінювання звуку надавалася велика увага.

Відомі роботи з досліджень перетворювачів вчених: В. Т. Гринченка, О. Г. Лейка, В. Г. Савіна, А. В. Коржика, І. В. Вовка, С. А. Найди, В. С. Дідковського, А. В. Дерепи, В. Н. Хмелева, Е. В. Ільченка, М. В. Богуша, В. В. Богородського, Умеди М. (Umeda, M), Накамура К. (Nakamura, K.), Такахаші С. (Takahashi, S.), Учино К. (Uchino, K), Матисон А. (Mathieson, A), Ли Х. (Lee H.).

Але перелік невирішених проблем ще залишається досить великим. При розробці конструкцій приладів технічної акустики необхідно врахувати і забезпечити впливи зовнішніх і внутрішніх умов експлуатації. Дається взнаки якість технології на виготовлення конструкцій. Для складання методик розрахунків конструктивних параметрів електромеханічних приладів треба проводити кількісні оцінки різного виду впливів. Тому виникла необхідність створення теоретичних основ розрахунків та фізико-технічних засад конструювання електромеханічних пристроїв акустики різного призначення з урахуванням всіх аспектів і наслідків зв'язаних фізичних полів та процесів. Треба враховувати ще й різноманіття пружних середовищ.

Зрозуміло, що все це можливо здійснити при наявності відповідного розрахункового забезпечення. Цим визначена актуальність обраної теми дисертації, що сумнівів не викликає.

Наведені в дисертації наукові положення та результати у сукупності дозволяють сумісно і повно задовольнити вимогам сучасних комплексних проблем акустики пружних середовищ і тим самим забезпечити розв'язання важливої для держави науково-технічної проблеми.

У зв'язку з цим при виконанні досліджень у дисертаційній роботі поставлені *мета і задачі*.

2. Мета і задачі.

Метою дисертації є розробка теоретичних основ розрахунку та фізико-технічних засад конструювання електромеханічних приладів акустики пружних середовищ з урахуванням наслідків взаємодії в їх конструкціях фізичних полів різної природи при перетворенні і формуванні енергії, взаємодії з пружними середовищами які обумовлюють перехід перетворювачів зі стану одномодових в стан багатомодових та впровадження цих наслідків в практику акустики пружних середовищ.

Для досягнення поставленої мети розв'язані *наступні задачі*.

1. Аналіз нових знань в технічній акустиці, в частині зв'язку фізичних полів різної природи при перетворенні енергії в п'єзокерамічних середовищах, взаємодії акустичних полів при їх формуванні в оточуючих пружних середовищах і взаємного зв'язку процесів перетворення, формування енергії та їх впливу на процес конструювання електромеханічних приладів акустики на основі багатомодових коливальних систем.

2. Аналіз експлуатаційних навантажень п'єзокерамічних приладів акустики з урахуванням наслідків дії пружних середовищ та взаємодії полів і процесів, що призводить до появи багатомодовості електромеханічних приладів акустики та розробка фізико-технічних заходів щодо їх врахування в процесі конструювання.

3. Розробка теоретичних основ та методів розрахунків механічної міцності конструкцій випромінюючих п'єзокерамічних приладів при дії на них полів різної фізичної природи та пружних середовищ.

4. Розробка теоретичних основ та методів розрахунків електричної міцності конструкцій п'єзокерамічних приладів з урахуванням дії різних фізичних факторів.

5. Розробка теоретичних основ та методів розрахунків теплової міцності конструкцій випромінюючих п'єзокерамічних приладів різних типів на основі багатомодових коливальних систем.

Об'єктом дослідження є процеси забезпечення в конструкціях електромеханічних приладів акустики їх механічної, електричної та теплової міцності конструкцій із урахуванням наслідків дії пружних середовищ та взаємодії фізичних полів і процесів, що виникають при перетворенні і формуванні енергії.

Предметом дослідження є створення теоретичних основ розрахунків та фізико-технічних засад конструювання електромеханічних приладів акустики пружних середовищ з акцентом на рідинні, особливо морські, дія яких є найбільш складною і агресивною.

Методами дослідження є методи математичної фізики, обчислювальні методи та методи експериментальних визначень характеристик матеріалів та елементів конструкцій. При цьому наукові положення і висновки, що представлені в дистанційній роботі, сформульовані на підставі застосування методів постановки і розв'язання задач стаціонарної гідроелектропружності, рівнянь дифузії молекул пару в рідині і через границю розподілу рідини і середовищ, рівнянь теплопровідності Фур'є, методу розділення змінних та методу редукції.

Достовірність отриманих результатів підтверджується збігом теоретичних даних з результатами експериментальних досліджень.

В дисертації отримано такі нові наукові результати:

1. Запропоновано принципово новий підхід в розробці конструкцій електромеханічних приладів акустики пружних середовищ, що полягає в розгляді цих приладів як частини складної коливальної системи «електромеханічний прилад акустики – пружне середовище». Це дозволило встановити, що конструкції приладів стають багатомодовими, мають нижчі діапазони робочих частот, а величини їх механічних та електричних навантажень в кілька разів перевищують аналогічні значення порівняно з одномодовими конструкціями.

2. Вперше показано, що вид електричного збудження значно впливає на характеристики конструкцій багатомодових приладів, зокрема на положення резонансних частот та на величини їх електричних і механічних навантажень. Для частотно-незалежних, частотно-залежних та змішаних видів збудження значення цих величин відрізняються в 2-4 рази.

3. Вперше встановлено, що у випадку електричного збудження багатомодових приладів частотно-незалежними електричними сигналами, основним параметром, який визначає їх конструкцію, є механічна складова міцності. Це обумовлено збільшенням механічних навантажень в 3-6 разів в області низьких частот порівняно з одномодовими приладами.

4. Вперше встановлено, що у разі електричного збудження багатомодових приладів частотно-залежними електричними сигналами, основним параметром, який визначає їх конструкцію, є електрична складова міцності. При цьому механічна складова забезпечується завданням допустимих значень коливальної швидкості, навіть на межі механічної міцності матеріалів приладів на розрив.

5. Вперше отримано вирази для розрахунку величин механічних навантажень конструкцій і визначено їх кількісні значення з врахуванням багатомодовості приладів акустики. В результаті цього здійснено обґрунтований кількісний вибір елементів конструкцій з метою забезпечення їх статичної і динамічної міцності для випадку, коли резонансні частоти коливальних систем приладів знижуються більше, ніж у 2 рази, а механічні

навантаження збільшуються більше, ніж у 2 рази порівняно з одномодовими конструкціями.

6. Вперше визначені фізичні фактори, які впливають на електричну міцність конструкцій електромеханічних приладів та шляхом розв'язку диференціальних рівнянь дифузії отримані аналітичні співвідношення для знаходження її величини в залежності від: концентрації парів рідини; відносної вологості; питомого електричного опору, температури та робочої частоти п'єзокерамічних та полімерних електроізоляційних матеріалів; коефіцієнтів дифузії, проникливості та поглинання рідини конструкційними матеріалами. Це дозволило отримати кількісні значення електричної міцності конструкцій на різних етапах їх конструювання.

7. Вперше на основі розв'язку диференціальних рівнянь теплопровідності Фур'є отримано та за допомогою комп'ютерного моделювання методом скінченних елементів підтверджено аналітичні залежності температур та часу розігріву конструкцій приладів від типу п'єзокераміки та інших конструкційних матеріалів, температури пружних середовищ, а також варіантів побудови цих конструкцій. Це дозволяє зменшувати температуру і збільшувати час розігріву приладів під час експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів

1. Процес розробки конструкцій п'єзокерамічних акустичних приладів отримав можливості вибору характеру електричного збудження випромінюючих приладів, виходячи з вимог щодо їх механічної, електричної міцностей та допустимих теплових навантажень в залежності від умов пружних середовищ та існуючих технічних можливостей практичної реалізації вибраного варіанту електричного збудження;

2. Конструювання п'єзокерамічних акустичних приладів забезпечено методами і методиками щодо кількісного визначення значень механічної міцності розроблюваних конструкцій. Це дозволяє шляхом зіставлення результатів розрахунків механічної міцності здійснювати різні варіанти побудови конструкцій як за вибраними схемами побудови, так і за окремими елементами конструкцій;

3. Для процесу розробки конструкцій п'єзокерамічних акустичних приладів створене розрахункове забезпечення в частині електричної міцності конструкцій приладів. Це дозволяє порівнювати між собою варіанти конструктивної реалізації приладів щодо електричної міцності без їх виготовлення та змінювати в процесі конструювання такі складові конструкцій як тип вибраного матеріалу, розміри деталей та інше, змінюючи при цьому значення електричної міцності конструкції приладу в 2-4 рази;

4. Створене розрахункове забезпечення щодо визначення теплових навантажень конструкцій п'єзокерамічних акустичних приладів, що дозволяє в широких межах здійснювати в процесі конструювання зміни схеми побудови конструкцій приладів з метою пошуку раціональних варіантів відводу тепла в залежності від типу пружного середовища, вибору застосованих конструкційних матеріалів, розмірів деталей тощо. Значення

випромінюваної потужності може змінюватись при цьому в 1,5-2 рази без збільшення теплових навантажень конструкцій.

3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, практичне значення отриманих у дисертаційній роботі результатів.

Виконання дисертаційної роботи пов'язано з науковими тематиками та планами кафедри Акустичних та мультимедійних електронних систем Національного Технічного Університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Отже, *практичне значення* отриманих у дисертаційній роботі результатів підтверджується їх використанням при виконанні НДР кафедри. Тема дисертації пов'язана з науковим напрямком кафедри, а також з науково-технічними програмами та держбюджетними конкурсними темами Міністерства освіти та науки України і відповідає спеціальності 171 Електроніка за напрямом 17 Електроніка та телекомунікації.

Результати дисертаційної роботи впроваджені:

- В практику проектних робіт в Державному підприємстві «Київський науково-дослідний інститут гідроприладів» (Державний концерн «Укроборонпром») при виконанні договору №155/16 від 22.11.2016 р., (додаткова угода №4 від 11.06.2019р.) "Широкопasmові випромінюючі та приймаючі електроакустичні тракти акустичних приладів".

- В навчальний процес Національного технічного університету України «КПІ імені Ігоря Сікорського» при підготовці бакалаврів, магістрів та аспірантів зі спеціальності 171 «Електроніка» з дисциплін «Електроакустичні перетворювачі», «Акустичні антени», «Конструювання акустичних приладів та систем», «Сучасні тенденції в електроакустичних технологіях»;

Дані методики та рекомендації будуть корисні при конструюванні електричних перетворювачів. Наведені рекомендації щодо зменшення максимальної температури розігріву стержневого перетворювача корисні для конструювання перетворювачів, в яких теплові навантаження виходять за границі допустимих норм.

Всі впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджені відповідними актами.

4. Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, 85 рисунків, списку використаних джерел із 198 найменувань та 4 додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 341 сторінку.

5. Особистий внесок здобувача.

Публікації

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 37 наукових праць, 22 роботи опубліковано у фахових журналах, з них 5 статей у виданнях, що включені до наукометричних баз SCOPUS та Web of Science Core Collection, 1 монографія, 11 опубліковано в матеріалах і тезах доповідей; оригінальні рішення захищені 2 патентами України на винахід та є патент на корисну модель. В роботі узагальнено результати багаторічних досліджень,

виконаних автором самостійно і висвітлених у 2 самостійних працях. Роботи, виконані із співавторами, наведені в переліку публікацій. При цьому із них безпосередньо здобувачу належать вибір та обґрунтування напрямку досліджень, постановка задач на різних етапах роботи, аналіз та інтерпретація одержаних результатів.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати дисертаційного дослідження доповідались на 11 міжнародних науково-практичних конференціях. Апробація матеріалів дисертації достатня.

6. Основний зміст дисертації.

Зміст дисертаційного дослідження викладений у п'яти розділах, у яких представлені та обґрунтовані основні результати роботи.

У *вступі* обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, описано методи дослідження, надана інформація про наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

Розділ 1 присвячений аналізу фізичних проблем обмеження рівня випромінюваної акустичної потужності конструкціями електроакустичних приладів в різних пружних середовищах. Автор констатує, що випромінювання акустичної потужності пов'язане із взаємодією трьох фізичних полів – механічного, електричного і акустичного та особливостей рідинного середовища (кавітація), в якому працюють ці прилади. Результатом взаємодій є також поява теплового поля конструкцій електромеханічних приладів.

Автор робить висновок, що майже відсутнє розрахункове забезпечення конструювання електроакустичних приладів особливо для рідин. Автор виявив можливі три підходи до створення електричного збудження, що забезпечує випромінювання максимальної акустичної потужності при збереженні міцності конструкцій. Після детального розгляду антени автор робить висновок: при розробці конструкцій приладів потребує спільний розгляд впливу первинних електричних і механічних обмежуючих фізичних факторів. Тільки таким чином можливо визначити раціональні підходи до розробки конструкцій приладів з максимальною енергетичною ефективністю при роботі у складі системи. При цьому із фізичних уявлень зрозуміло, що в принципі існують три можливі підходи. Далі автор описує ці підходи.

Автор пропонує: у зв'язку з наведеним, в наступних розділах дисертації будуть викладені результати досліджень, одержаних по розрахунковому забезпеченню конструювання акустичних приладів в частині механічної, електричної міцностей та тепловим випромінюванням. При цьому пріоритет надано рідинному (морському) пружному середовищу.

В **розділі 2** автором вирішена важлива науково-технічна проблема з конструкторсько-технологічної реалізації електроакустичних приладів з урахуванням перспективних вимог до їх параметрів та умов експлуатації. Для пружних рідинних середовищ, а саме морських, як найбільш складних і агресивних, визначені основні експлуатаційні навантаження та фізично

обґрунтовані підходи до них. Автор урахував: зовнішній статичний тиск і конструкторські способи нейтралізації його впливу; довготривалу механічну міцність конструкцій електромеханічних приладів і конструкторські рішення щодо її забезпечення; електричну міцність; теплову міцність. Наведений автором аналіз дозволив створити нові підходи до комплексного спільного розв'язання конструкторсько-технологічної реалізації підводних електроакустичних приладів. Це вирішує проблему спільного розв'язання для використання у конструкторських рішеннях при створенні підводних електроакустичних приладів.

Автор на практиці запропонував нові підходи до конструювання перспективних електроакустичних приладів, які відрізняються між собою саме діапазонами робочих частот, умовами експлуатації, великим різноманіттям гідроакустичних технологій, технологічних процесів виготовлення. Автор пропонує проводити конкретні методи конструювання. Це:

- конструювання підводних акустичних антен із перетворювачів з індивідуальною герметизацією і без неї, але з використанням загального герметизуючого корпусу;
- конструювання антен з жорсткими і гнучкими несучими каркасами;
- модульний принцип побудови конструкцій антен;
- використання принципу побудови конструкцій антен з керуванням їх розмірами і формою;
- суміщення в одному об'ємі конструкцій різних антен як за призначенням, так і за формою;
- створення решітчастості конструкцій підводних антен.

Автор приводить приклади побудови конструкцій приладів з використанням викладених підходів. При цьому автор вказує на тривалі жорсткі умови в експлуатації електроакустичних приладів. Це їх робота в умовах високого зовнішнього тиску (десятки мегапаскалів) в агресивних середовищах при дії на них значних електричних напруг (кілька тисяч вольт), застосування нових конструкційних матеріалів, створення нових технологічних прийомів виготовлення приладів. Що є новим підходом. Особистий внесок здобувача викладений в проведених патентних дослідженнях, моделюванні та у розробці описів винаходів і корисної моделі.

Розділ 3 присвячений механічній міцності конструкцій п'єзокерамічних електроакустичних приладів. Вірно визначено, що в процесі експлуатації конструкції електроакустичних приладів вони зазнають дію як статичних, так і динамічних (знакозмінних) навантажень. Для збереження міцності конструкцій приладів необхідно, щоб робочі навантаження, що створюються всіма видами впливу, не перевищували руйнівних значень, та ще й з певним коефіцієнтом запасу на надійність. Автор знайшов математичний вираз для визначення сумарних механічних напружень, які виникають в конструкціях вузлів та приладів, та привів його вираз. Визначені вирази для розрахунків в залежності від конструктивних схем побудови гідроакустичних приладів різного призначення, що має велике значення в конструюванні приладів.

Тонкощі впливу прийнятих при розробці конструкції приладу конструкційних і технологічних рішень на статичну міцність конструкції приладу під дією зовнішнього тиску демонструє схема побудови циліндричного приладу силової конструкції. Автор її приводить. Із наведених виразів витікають конструкційні шляхи зменшення статичних напружень – збільшення товщини призм та розміщення між ними вставок із матеріалу з меншим модулем пружності, ніж модуль пружності п'єзокераміки. Встановлено, що це дозволяє збільшити статичну механічну міцність конструкцій орієнтовно в 1,5 рази.

Автор наводить математичний вираз в загальному вигляді для розрахунку випромінюваної потужності.

Використання відносних величин напружень робочого циклу і армуючих напружень дозволяє з допомогою ряду коефіцієнтів врахувати в кожному конкретному випадку особливості міцності та конструкції активного елемента електроакустичного приладу. Автор робить висновок: одним з найефективніших засобів забезпечення тривалої циклічної міцності активних елементів випромінюючих електроакустичних приладів є створення в них попередніх стискуючих напружень (напружень армування). Це є важливою рекомендацією у практичному використанні принципів конструювання.

Розроблена і наведена на прикладі кругового циліндричного приладу процедура переходу до розрахунків розмірів і натягів зміцнюючих елементів, які дозволяють створити в активному елементі армуючі напруження, необхідні для забезпечення потрібної механічної міцності конструкції електроакустичного приладу. Це є практична рекомендація. Другий, третій і четвертий розділи побудовані логічно.

В розділі 4 встановлено, що причинами фізичного зменшення електричної міцності конструкцій електроакустичних приладів є: руйнування вузлів ізоляції конструкції під дією часткових електричних розрядів; теплове старіння конструкційних електроізоляційних матеріалів; зниження міцності ізоляції конструкцій з причини зволоження активних елементів.

Розроблено та апробовано методи розрахунків концентрації парів рідини в конструкціях електроакустичних приладів різних типів: силових, розвантажених та компенсованих. Встановлено, що основою всіх цих розрахунків є знання кількісних значень характеристик вологості конструкційних матеріалів – коефіцієнтів дифузії, проникливості та поглинання. Щодо механізму дії парів рідини на електричну міцність конструкцій електроакустичних приладів, автором вони поділені на три групи: - конструкції з адгезією полімерів до активного п'єзокерамічного елемента; - конструкції з полімерами без адгезії до активного елемента; - конструкції з наявністю в їх складі вбудованих осушувачів.

Автором визначено вирази для знаходження загального часу вологозахисту конструкції електроакустичного приладу. Результати, що отримані автором в розділі 4, носять практичний характер.

В розділі 5 викладені результати досліджень методів розрахунків теплової міцності конструкцій електроакустичних приладів. Особливістю роботи п'єзокерамічних приладів є нагрівання їх конструкцій внаслідок виділення тепла в активних елементах, виготовлених з п'єзокераміки. Причиною розігріву є механічні та електричні втрати в матеріалах активних елементів. Відомо, що внутрішній розігрів приладів призводить до ряду негативних наслідків, зокрема деполяризації п'єзокераміки, зміни їх електроакустичних характеристик, механічних руйнувань. Ліквідація цих ефектів стала важливою науковою проблемою, що розв'язав автор.

Проаналізовані теплові поля ряду конструкцій електроакустичних приладів – стержневих та циліндричних. Для типових конструкцій цих перетворювачів встановлені залежності температурного розподілу в стаціонарному режимі, визначений час розігріву до максимальної температури та встановлені найбільш проблемні ділянки таких конструкцій.

Автором запропоновано методику аналізу теплових полів перетворювачів, яка полягає в:

- аналітичному розрахунку теплових полів шляхом розв'язання диференціального рівняння теплопровідності Фур'є для спрощеної моделі приладу та розрахунку об'ємної потужності джерел тепловиділення;
- комп'ютерному моделюванні теплового режиму роботи приладів з визначенням найбільш небезпечних ділянок в їх конструкції методом скінчених елементів.

Комп'ютерне моделювання теплових режимів роботи конструкцій електроакустичних приладів автор провів в програмі Solid Works. Зокрема розглянуті стаціонарний і перехідний режими.

Виконані розрахунки дозволили автору мати практичне втілення його результатів.

7. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

У дисертаційній роботі мета і задачі дослідження поставлені і сформульовані чітко. Автор досить коректно використав відомі наукові методи обґрунтування отриманих результатів, висновків і рекомендацій. Дисертантом глибоко вивчені та критично проаналізовані відомі досягнення і теоретичні положення інших авторів. Проведений аналітичний огляд літературних джерел достатній, наявні посилання, що підтверджують використані ствердження.

Вирішення проблем, що поставлені у дисертації, ґрунтуються на відомих досягненнях фундаментальних і прикладних наукових дисциплін.

У дисертації автор грамотно використовує методи математичної фізики, коректно ставить початкові й граничні умови.

В дисертаційній роботі заявлені 7 пунктів наукової новизни отриманих результатів, серед яких 6 – вперше.

Основними науковими здобутками автора є запропонований принципово новий підхід в розробці конструкцій електромеханічних приладів акустики пружних середовищ, що полягає в розгляді цих приладів

як частини складної коливальної системи «електромеханічний прилад акустики – пружне середовище». Це дозволило встановити, що конструкції приладів стають багатомодовими, мають нижчі діапазони робочих частот, а величини їх механічних та електричних навантажень в кілька разів перевищують аналогічні значення порівняно з одномодовими конструкціями.

Вперше показано, що вид електричного збудження значно впливає на характеристики конструкцій багатомодових приладів, зокрема на положення резонансних частот та на величини їх електричних і механічних навантажень.

Вперше встановлено, що у випадку електричного збудження багатомодових приладів частотно-незалежними електричними сигналами, основним параметром, який визначає їх конструкцію, є механічна складова міцності. Це обумовлено збільшенням механічних навантажень в 3-6 разів в області низьких частот порівняно з одномодовими приладами.

Вперше отримано вирази для розрахунку величин механічних навантажень конструкцій і визначено їх кількісні значення з врахуванням багатомодовості приладів акустики. В результаті цього здійснено обґрунтований кількісний вибір елементів конструкцій з метою забезпечення їх статичної і динамічної міцності. Особливим моментом є випадок, коли резонансні частоти коливальних систем приладів знижуються більше, ніж у 2 рази, а механічні навантаження збільшуються більше, ніж у 2 рази порівняно з одномодовими конструкціями.

Вперше визначені фізичні фактори, які впливають на електричну міцність конструкцій електромеханічних приладів та шляхом розв'язку диференціальних рівнянь дифузії отримані аналітичні співвідношення для знаходження її величини в залежності від: концентрації парів рідини; відносної вологості; питомого електричного опору, температури та робочої частоти п'єзокерамічних та полімерних електроізоляційних матеріалів; коефіцієнтів дифузії, проникливості та поглинання рідини конструкційними матеріалами. Це дозволило отримати кількісні значення електричної міцності конструкцій на різних етапах їх конструювання.

Вперше на основі розв'язку диференціальних рівнянь теплопровідності Фур'є отримано та за допомогою комп'ютерного моделювання методом скінченних елементів підтверджено аналітичні залежності температур та часу розігріву конструкцій приладів від типу п'єзокераміки та інших конструкційних матеріалів, температури пружних середовищ, а також варіантів побудови цих конструкцій. Це дозволяє зменшувати температуру і збільшувати час розігріву приладів під час експлуатації.

Для аналітичного розрахунку та комп'ютерного моделювання автором використані сучасні методи програмування, зокрема Solid Work.

Достовірність результатів, застосованих методів розрахунку конструкцій на механічну міцність, рівнів електричних та теплових полів підтверджувалася відповідністю теоретичних і експериментальних досліджень.

Висновки основані на розрахунках та моделюванні, вони логічні і послідовні. Висновки та рекомендації носять чіткий характер та направлені на використання результатів наукових досліджень у впровадження.

У цілому, результати, отримані автором, є новими науковими знаннями.

Отримані в роботі результати можуть використовуватись у навчальному процесі вищих навчальних закладів України, у тому числі НТУУ «КПІ» імені Ігоря Сікорського при підготовці інженерів-акустиків.

8. Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях. За темою дисертації опубліковано достатня кількість наукових робіт (див. п. 5 «особистий внесок здобувача»). Результати дисертаційної роботи доповідались на 11 міжнародних конференціях, що свідчить про достатню апробацію дисертаційного дослідження. Рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам ДАК України.

9. Оцінка мови, стилю та оформлення дисертації. Дисертаційну роботу написано українською мовою. Результати дослідження представлені у доступному для сприйняття та використанні стилі. Робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів з висновками по кожному, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків, що задовольняє вимогам необхідній структурі дисертації.

10. Загальні зауваження до дисертаційної роботи

1. Вважаю, що в авторефераті формули повинні бути пронумеровані. Наприклад, на сторінках 8, 9 важливими є диференціальні рівняння Гельмгольца, руху, вимушеної електростатики, на сторінці 13 – вираз випромінюваної потужності, на сторінці 16 та 19 - математичні закони дифузії, на сторінці 24 диференціальне рівняння теплопровідності Фур'є. Тоді у подальшому автор зміг би написати наступне: наприклад, сторінка 19, «за рівнянням (...) визначаємо час роботи конструкції». Чи на сторінці 25 «рівняння теплопровідності (...) розв'язано для кожного шару.
2. В роботі запропоновано новий підхід до розробки конструкцій п'єзокерамічних електромеханічних приладів акустики пружних середовищ, сутність якого полягає в тому, щоб розглядати коливальні процеси, як частини складної коливальної системи «електромеханічний прилад акустики - пружне середовище». На мій погляд, саме на переході режиму роботи приладів зі стану одномодових в багатомодові потрібно було зробити більший наголос, адже це суттєво змінює величини механічних і електричних навантажень при роботі конструкцій.
3. Термін «вперше» звичайно використовується в формулюванні пунктів новизни, а не в формулюванні висновків з дисертації.

Зазначені зауваження не знижують цінності дисертаційної роботи та не є критичними.

11. Відповідність встановленим вимогам.

Зміст дисертації повністю відповідає спеціальності 05.09.08 – Прикладна акустика та звукотехніка.

Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам

Вважаю, що дисертація **О. І. Дрозденка** «Теоретичні основи розрахунків та фізико-технічні засади конструювання електромеханічних приладів акустики пружних середовищ» є завершеною науковою працею, що виконана на високому науковому і методичному рівнях, в ній представлено нові наукові результати, спрямовані на вирішення важливої науково-технічної проблеми теоретичного та практичного забезпечення конструювання електромеханічних приладів акустики пружних середовищ. Зміст автореферату відображає основні положення, наведені в дисертаційній роботі.

За актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною, змістом та оформленням дисертаційна робота повністю відповідає вимогам пунктів 7, 8, 9 "Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. №1197, а її автор **Дрозденко Олександр Іванович** заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.08 - прикладна акустика та звукотехніка.

Офіційний опонент,
професор кафедри механотроніки,
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара,
доктор технічних наук, професор,
Відмінник Освіти України



Г. І. Сокол

Підпис офіційного опонента доктора технічних наук,
Професора Сокол Г. І. засвідчую

Учений секретар Дніпровського
національного університету імені Олеся Гончара
к. ф. - м. н., доцент



Т. В. Ходанен