

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Міністерство освіти і науки України

ДРОЗДЕНКО ОЛЕКСАНДР ІВАНОВИЧ

УДК 534.232

ДИСЕРТАЦІЯ

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКІВ ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ
ЗАСАДИ КОНСТРУЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРИЛАДІВ
АКУСТИКИ ПРУЖНИХ СЕРЕДОВИЩ**

Спеціальність 05.09.08 – Прикладна акустика та звукотехніка

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



О.І. Дрозденко

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Дрозденко О.І. Теоретичні основи розрахунків та фізико-технічні засади конструювання електромеханічних приладів акустики пружних середовищ. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.08 «Прикладна акустика та звукотехніка». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2024.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми створення теоретичних основ розрахунків і фізико-технічних засад конструювання електромеханічних приладів акустики пружних середовищ, побудованих на основі багатомодових коливальних систем в частині їх механічної, електричної і теплової міцності з урахуванням появи нових знань щодо взаємодії фізичних полів і процесів при перетворенні та формуванні енергії та умов застосування цих приладів в пружних середовищах.

В першому розділі проведений аналіз фізичних проблем обмеження рівня випромінюваної акустичної потужності конструкціями електроакустичних приладів в різних пружних середовищах. 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.

Встановлено, що кожне з цих полів має свої фізичні фактори, які обмежують випромінювання максимальної акустичної потужності. Всі вони пов'язані з характеристиками міцності по кожному з цих полів. При цьому слід прийняти до уваги наступні два моменти. Перший з них пов'язаний з тим, що до останнього часу було майже відсутнє розрахункове забезпечення конструювання

електроакустичних приладів особливо для рідин. Другий момент пов'язаний з результатами новітніх досліджень, щодо перетворення та формування полів в пружних середовищах.

В п'єзокерамічних приладах особливість перетворення енергії полягає у взаємному зв'язку електричних, механічних і акустичних полів. Особливістю формування полів в пружних середовищах є взаємодія полів, випромінених і розсіяних елементами приладів, обумовлена багатократним перевідбиттям звукових хвиль. Третьою особливістю є взаємодія процесів перетворення та формування енергії. В останній час при визначенні акустичних полів конструкцій електроакустичних приладів стало можливим враховувати акустичну взаємодію полів. Нові знання суттєво змінили уявлення конструкторів електроакустичних приладів про перебіг коливальних процесів в п'єзокерамічних акустичних приладах, про можливості випромінювання максимальних акустичних потужностей в залежності від типу пружного середовища і про пов'язані з ними проблеми міцності конструкцій приладів і дозволили зробити наступні висновки.

По-перше, перебіг коливальних процесів та максимальна випромінювана акустична потужність, а відтак, і міцність конструкцій електроакустичних приладів залежить від характеру організації їх електричного збудження.

По-друге, можливі три підходи до створення електричного збудження, що забезпечує випромінювання максимальної акустичної потужності при збереженні міцності конструкцій.

По-третє, врахування взаємного зв'язку між фізичними полями при перетворенні енергій, акустичного зв'язку між елементами приладів і взаємного впливу процесів перетворення і формування енергії суттєво змінили і ускладнили проблему міцності конструкцій електроакустичних приладів, особливо для рідинних (морських) середовищ. І це ускладнення повинно бути обов'язково враховано при розробці конструкцій приладів.

По-четверте, з'явилась необхідність в методичному забезпеченні щодо чисельних розрахунків характеристик всіх задіяних при випромінюванні звуку фізичних полів і зв'язаних з ними міцностей конструкцій з врахуванням всіх видів взаємодій.

Розглянута задача про випромінювання звуку довільною системою випромінювачів, утвореною зі скінченної кількості кругових п'єзокерамічних циліндричних випромінювачів з окружною поляризацією. Аналіз результатів показав, що в перспективних конструкціях п'єзокерамічних акустичних приладів механічна і електрична міцності конструкцій повинні бути в кілька разів більшими порівняно з тими випадками, коли не враховують діючі фізичні поля та зв'язок між ними.

В **розділі 2** проведено аналіз сучасних фізико-технічних проблем конструкторсько-технологічної реалізації електроакустичних приладів з урахуванням перспективних вимог до їх параметрів та умов експлуатації. Для пружних рідинних середовищ визначені основні експлуатаційні навантаження та обґрунтовані підходи до їх вирішення для підводних електроакустичних приладів різного призначення. До них віднесені: зовнішній статичний тиск і конструкторські способи нейтралізації його впливу; довготривала механічна міцність конструкцій електромеханічних приладів і конструкторські рішення щодо її забезпечення; довготривала електрична міцність конструкцій електроакустичних приладів і конструкторські рішення щодо її забезпечення; теплова міцність конструкцій випромінюючих електроакустичних приладів. Наведений аналіз дозволяє створити нові підходи до комплексного спільного розв'язання конструкторсько-технологічної реалізації підводних електроакустичних приладів.

Виконано постановку і розв'язок задач пошуку нових підходів до конструювання перспективних електроакустичних приладів різного призначення, які відрізняються між собою діапазонами робочих частот, умовами

експлуатації, та як великим різноманіттям гідроакустичних технологій, так і технологічних процесів виготовлення конструкцій приладів.

Показано, що жорсткі вимоги до конструкцій підводних електроакустичних приладів, пов'язані з тривалим часом їх роботи в умовах високого зовнішнього тиску, в агресивних середовищах, при дії на них значних електричних напруг, обумовлюють постійний пошук і практичну реалізацію різних фізичних принципів побудови приладів, постійне удосконалення підходів до розробки їх конструкцій з урахуванням постійно зростаючих вимог до умов експлуатації, застосуванням нових конструкційних матеріалів тощо.

Третій розділ присвячений забезпеченню механічної міцності конструкцій електромеханічних приладів акустики. В процесі експлуатації конструкції електроакустичних приладів зазнають дію як статичних, так і динамічних 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.

Запропоновані конструкційні шляхи зменшення статичних механічних напружень шляхом 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.

Зазначено, що механічні динамічні напруження, які утворюється при роботі конструкцій електромеханічних приладів в режимі випромінювання звуку залежать від характеру режиму випромінювання, конструктивного виконання приладу та його вузла армування, характеру коливань, параметрів коливальної системи та технології складання приладу. Чим більша питома акустична потужність яку випромінює електроакустичний прилад, тим більші динамічні напруження утворюється в його активному елементі.

Встановлено, що одним з найефективніших засобів забезпечення тривалої циклічної міцності активних елементів випромінюючих електроакустичних приладів є створення в них попередніх стискуючих напружень – напружень армування. Вибір цих армуючих напружень в залежності від величини амплітуди напружень робочого циклу здійснюється з урахуванням параметрів розподілу меж міцності п'єзоелементів, коефіцієнтів концентрації напружень, конструктивних особливостей активних елементів тощо. Отримано зв'язок між амплітудою напружень робочого циклу і інтервалом значень армуючих напружень у вигляді діаграми граничних циклів навантаження п'єзоелементів. Встановлено, що застосування армування в конструкціях п'єзокерамічних приладів акустики дозволяє збільшити їх динамічну механічну міцність не менш ніж (1,8 – 2,2) рази в залежності від типу приладу.

Розроблена і наведена на прикладі кругового циліндричного приладу процедура переходу до розрахунків розмірів і натягів зміцнюючих елементів, що їм відповідають, які дозволяють створити в активному елементі армуючі напруження, необхідні для забезпечення потрібної механічної міцності конструкції електроакустичного приладу.

В четвертому розділі роботи досліджена електрична міцність конструкцій електромеханічних приладів акустики. 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.

На надійність і довговічність електричної міцності конструкцій випромінюючих електроакустичних приладів, обумовлених дією збуджуючих їх електричних напруг, впливають: амплітуда, частота і тривалість прикладеної збуджуючої напруги; ступінь вологості матеріалів, з яких утворена конструкція; температура оточуючого середовища і ступінь власного розігріву елементів

конструкції, які спроможні визвати зміни параметрів, механічне руйнування і теплову деструкцію електроізоляційних матеріалів. Визначено аналітичні співвідношення, пов'язані з наведеними складовими і характеристиками електроізоляційних матеріалів, взявши за основу залежності опору ізоляції від концентрації парів рідини, відносної вологості, та температури.

Встановлено зв'язок між електричною міцністю та герметизацією конструкцій, тим більше для приладів, що працюють в рідинних середовищах, які звичайно є електропровідними. Крім того, електроакустичні прилади є механічними коливальними системами, застосування в конструкціях яких полімерних матеріалів забезпечує необхідну свободу здійснення коливальних процесів. Але наявність таких матеріалів в конструкціях електроакустичних приладів завжди обумовлює появу дифузії молекул рідини робочого середовища у внутрішні об'єми цих конструкцій.

Розроблена методика розрахунку часу ефективної роботи електроакустичного приладу при наявності в ньому полімерних матеріалів. Встановлено, що час ефективної роботи приладу залежить від величини та направленості дифузійного потоку через герметизуючу оболонку, вологоємності внутрішнього об'єму та вологостійкості активного елемента. Такі методики розроблені для кількох поширених типів конструкцій електроакустичних приладів.

Розроблені та апробовані 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. Для деяких конструкційних матеріалів визначені конкретні чисельні дані.

В розділі 5 викладені результати досліджень методів розрахунків теплової міцності конструкцій електромеханічних приладів акустики. Особливістю

роботи п'єзокерамічних приладів є нагрівання їх конструкцій внаслідок виділення тепла в активних елементах, виготовлених з п'єзокераміки.

Запропоновано методику аналізу теплових полів перетворювачів, яка полягає в аналітичному розрахунку теплових полів шляхом розв'язання диференціального рівняння теплопровідності Фур'є та комп'ютерному моделюванні методом скінчених елементів теплового режиму роботи приладів з визначенням найбільш небезпечних ділянок в їх конструкції.

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.

За запропонованою методикою проведені дослідження теплових режимів роботи для деяких конструкцій циліндричних та стержневих конструкцій приладів. Для підтвердження результатів аналітичного розрахунку були проведені експериментальні дослідження працюючого електроакустичного приладу стержневої конструкції.

Проаналізована існуюча практика конструювання електроакустичних приладів в частині збільшення їх теплової міцності. Розглянуті пасивні і активні методи охолодження конструкцій приладів і можливості їх практичної реалізації в цих конструкціях. Серед них: використання різних типів радіаторів; зміна форми випромінюючої або тильної накладок стержневих конструкцій приладів, що підвищує ефективність охолодження на 15-25%; введення теплорозсіюючих шарів металевих вставок; введення між накладками і п'єзокерамікою деполяризованих п'єзокерамічних елементів; заповнення корпусів конструкцій газом, рідиною, або заливним матеріалом, термопастою. Це дозволяє збільшити теплопровідність конструкції.

В результаті дослідження створена і запропонована діаграма ефективності застосування пасивних методів охолодження конструкцій електроакустичних приладів. Це дозволяє зменшити температуру розігріву конструкцій в 1,5 – 2 рази і збільшити час їх розігріву.

Таким чином, в дисертаційній роботі проведено 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 і формування енергії та їх впливу на процес конструювання ЕМПА на основі багатомодових коливальних систем. Проаналізовано експлуатаційні навантаження електромеханічних приладів акустики з урахуванням наслідків дії пружних середовищ та взаємодії полів і процесів, що призводить до появи багатомодовості ЕМПА та розроблено фізико-технічні заходи щодо їх врахування в процесі конструювання. Розроблені теоретичні основи та методи розрахунків механічної, електричної та теплової міцності конструкцій випромінюючих п'єзокерамічних приладів різних типів на основі багатомодових коливальних систем.

Ключові слова: прилад електромеханічний, перетворювач п'єзокерамічний електроакустичний, міцність, навантаження механічні, навантаження електричні, навантаження теплові, герметизація, конструкція.

ANNOTATION

Drozdnenko O.I. Theoretical Foundations for Calculations and Physical-Technical Principles of Designing Electromechanical Devices for Acoustics of Elastic Media. – Qualification Scientific Work in Manuscript Form.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.09.08 "Applied Acoustics and Audio Engineering". – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute," Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and technical problem of creating theoretical foundations for the calculations and physical-technical principles of designing electromechanical acoustic devices for elastic media. These devices are based on multimodal oscillatory systems, with a focus on their mechanical, electrical, and thermal strength, considering new knowledge about the interaction of physical fields and processes in the conversion and formation of energy, as well as the conditions for applying these devices in elastic media.

In the first chapter, the analysis of physical problems limiting the level of acoustic power radiated by the structures of electroacoustic devices in various elastic media was carried out. The radiation of acoustic power is associated with the interaction of three physical fields – mechanical, electrical, and acoustic as well as the specific characteristics of the liquid medium (cavitation) in which these devices operate. The interaction of these fields also results in the emergence of a thermal field within the structures of the electromechanical devices.

It has been established that each of these fields has its own physical factors that limit the maximum radiation of acoustic power. All of them are related to the strength characteristics of each respective field. Two key aspects should be taken into account in this regard. The first is that, until recently, there was almost no computational support

for the design of electroacoustic devices, especially for liquid media. The second aspect concerns the results of recent studies on the transformation and formation of fields in elastic media.

In piezoceramic devices, the peculiarity of energy conversion lies in the mutual interaction of electrical, mechanical, and acoustic fields. A distinctive feature of field formation in elastic media is the interaction of fields radiated and scattered by the device elements, driven by the multiple reflections of sound waves. The third feature is the interaction between energy conversion and formation processes. Recently, it has become possible to account for the acoustic interaction of fields when determining the acoustic fields of electroacoustic device structures. These new insights have significantly changed the perspective of electroacoustic device designers regarding the behavior of oscillatory processes in piezoceramic acoustic devices, the ability to radiate maximum acoustic power depending on the type of elastic medium, and the related issues of structural strength. These advancements have led to the following conclusions.

Firstly, the behavior of oscillatory processes and the maximum radiated acoustic power, and consequently, the structural strength of electroacoustic devices, depend on the nature of the organization of their electrical excitation.

Secondly, there are three possible approaches to creating electrical excitation that ensures the radiation of maximum acoustic power while maintaining the structural strength of the devices.

Thirdly, the consideration of the mutual relationship between physical fields during energy conversion, the acoustic interaction between the elements of the devices, and the mutual influence of energy conversion and formation processes have significantly altered and complicated the structural strength problem of electroacoustic devices, especially for liquid (marine) environments. This complication must be necessarily taken into account during the design of device structures.

Fourthly, there arose a need for methodological support for numerical calculations of the characteristics of all physical fields involved in sound radiation and the associated structural strengths, considering all types of interactions.

The problem of sound radiation by an arbitrary system of radiators was examined, specifically, one formed by a finite number of circular piezoceramic cylindrical radiators with circumferential polarization. The analysis of the results demonstrated that in advanced designs of piezoceramic acoustic devices, the mechanical and electrical strengths of the structures must be several times greater compared to cases where the active physical fields and their interconnections are not considered.

In chapter 2, the analysis of modern physical and technical challenges in the design and technological implementation of electroacoustic devices, considering prospective requirements for their parameters and operating conditions was carried out. For elastic liquid media, the main operational loads have been identified, and approaches to addressing them for underwater electroacoustic devices of various purposes have been substantiated. These include external static pressure, design methods to neutralize its effects, long-term mechanical strength of electromechanical devices, and design solutions to ensure it, long-term electrical strength, and thermal strength of electroacoustic device structures. The analysis provides the basis for developing new approaches to the comprehensive and integrated resolution of design and technological implementation challenges for underwater electroacoustic devices.

The formulation and solution of problems aimed at finding new approaches to the design of advanced electroacoustic devices for various purposes have been carried out. These devices differ in their operating frequency ranges, operating conditions, and a wide variety of both hydroacoustic technologies and technological processes for manufacturing device structures.

It has been shown that the stringent requirements for the structures of underwater electroacoustic devices, associated with their prolonged operation under high external

pressure, in aggressive environments, and under significant electrical stresses, necessitate the continuous search for and practical implementation of various physical principles in device design. This also involves the ongoing improvement of approaches to developing their structures, considering the constantly increasing operational demands, the use of new structural materials, etc.

The third chapter focuses on ensuring the mechanical strength of electromechanical acoustic device structures. During operation, electroacoustic device structures are subjected to both static and dynamic loads. To preserve the structural integrity of the devices, the operating loads generated by all types of impacts must not exceed the breaking values, with an appropriate safety factor for reliability.

Structural methods have been proposed to reduce static mechanical stresses by increasing the thickness of prisms and placing inserts made of material with a lower elastic modulus than that of piezoceramics between them. It has been established that this allows increasing the static mechanical strength of structures by approximately 1,5 times.

It is noted that mechanical dynamic stresses generated during operation of electromechanical devices in sound radiation mode depend on the nature of radiation mode, structural design of the device and its reinforcement assembly, oscillation characteristics, parameters of the oscillating system, and device assembly technology. The higher the specific acoustic power radiated by the electroacoustic device, the greater the dynamic stresses generated in its active element.

It has been established that one of the most effective means of ensuring long-term cyclic strength of active elements in radiating electroacoustic devices is the creation of preliminary compressive stresses - reinforcement stresses. The selection of these reinforcement stresses, depending on the stress amplitude of the operating cycle, is carried out taking into account the distribution parameters of piezoelectric elements' strength limits, stress concentration factors, structural features of active elements, etc. The relationship between the stress amplitude of the operating cycle and the range of

reinforcement stress values has been obtained in the form of a limiting load cycles diagram for piezoelectric elements. It has been established that the application of reinforcement in the structures of piezoceramic acoustic devices allows increasing their dynamic mechanical strength by at least 1,8-2,2 times, depending on the device type.

A procedure has been developed and demonstrated using the example of a circular cylindrical device for transitioning to calculations of dimensions and corresponding interference fits of reinforcing elements, which allow creating reinforcement stresses in the active element necessary to ensure the required mechanical strength of the electroacoustic device structure.

In the fourth chapter, the electrical strength of electromechanical acoustic device structures was investigated. It has been established that the causes of physical reduction in electrical strength of electroacoustic device structures are: destruction of structural insulation units under the action of partial electrical discharges; thermal aging of structural electrical insulating materials; decreased insulation strength of structures due to moisture absorption by active elements.

The reliability and durability of electrical strength in radiating electroacoustic device structures, determined by the action of their exciting electrical voltages, are affected by the following factors: amplitude, frequency, and duration of the applied exciting voltage; moisture content of materials forming the structure; ambient temperature; and the degree of self-heating of structural elements, capable of causing parameter changes, mechanical destruction, and thermal degradation of electrical insulating materials. Analytical relationships associated with the above components and characteristics of electrical insulating materials have been determined, based on the dependence of insulation resistance on liquid vapor concentration, relative humidity, and temperature.

The relationship between electrical strength and structure sealing, especially for devices operating in liquid media, which are typically electrically conductive has been established. Furthermore, electroacoustic devices are mechanical oscillating systems,

where the use of polymer materials in their structures provides the necessary freedom for oscillatory processes. However, the presence of such materials in electroacoustic device structures always leads to the diffusion of liquid molecules from the operating medium into the internal volumes of these structures.

A methodology for calculating the effective operating time of an electroacoustic device containing polymeric materials has been developed. It has been established that the effective operating time of the device depends on the magnitude and direction of the diffusion flow through the sealing shell, the moisture capacity of the internal volume, and the moisture resistance of the active element. Such methodologies have been developed for several common types of electroacoustic device designs.

Methods for calculating the concentration of liquid vapors in the structures of various types of electroacoustic devices - power, unloaded, and compensated have been developed and tested. It has been established that the basis of all these calculations is the knowledge of quantitative values of the moisture characteristics of structural materials, such as diffusion coefficients, permeability, and absorption. Specific numerical data have been determined for certain types of structural materials.

Chapter 5 presents the results of research on methods for calculating the thermal strength of the structures of electromechanical acoustic devices. A distinctive feature of piezoceramic devices is the heating of their structures due to heat generation in the active elements made of piezoceramics.

A methodology for analyzing the thermal fields of transducers has been proposed, which involves the analytical calculation of thermal fields by solving Fourier's heat conduction differential equation and computer modeling using the finite element method to simulate the thermal operating mode of the devices. This approach identifies the most critical areas in their structures.

Thermal fields of several designs of electroacoustic devices, including rod and cylindrical structures, were analyzed. For typical designs of these transducers, the temperature distribution dependencies in the steady-state mode were established, the

heating time to the maximum temperature was determined, and the most problematic areas of such structures were identified.

Using the proposed methodology, studies of the thermal operating modes were conducted for certain cylindrical and rod device designs. To validate the results of the analytical calculations, experimental studies were performed on a functioning electroacoustic device with a rod structure.

The existing practices for designing electroacoustic devices to enhance their thermal strength were analyzed. Both passive and active cooling methods for device structures and their practical implementation in these designs were considered. These methods include: the use of various types of heat sinks; modifying the shape of the radiating or rear plates in rod device structures, which increases cooling efficiency by 15–25%; introducing heat-dissipating layers with metal inserts; incorporating depolarized piezoceramic elements between the plates and the piezoceramic material; filling the device enclosures with gas, liquid, casting material, or thermal paste. These approaches improve the thermal conductivity of the structures.

As a result of the research, a diagram of the efficiency of using passive cooling methods for electroacoustic device structures was developed and proposed. This approach enables a reduction in the heating temperature of the structures by 1,5–2 times and increases their heating time.

Thus, the dissertation analyzes new knowledge in technical acoustics regarding the interaction of physical fields of different natures during energy conversion in piezoceramic media, the interaction of acoustic fields during their formation in surrounding elastic media, and the interrelation of energy conversion and formation processes and their influence on the design of electromechanical acoustic devices based on multimode oscillatory systems.

The operational loads of electromechanical acoustic devices were analyzed, taking into account the effects of elastic media and the interaction of fields and processes, which lead to the emergence of multimode behavior in electromechanical

acoustic devices. Physico-technical measures were developed to account for these factors in the design process.

Theoretical foundations and methods for calculating the mechanical, electrical, and thermal strength of the structures of radiating piezoceramic devices of various types based on multimode oscillatory systems have been developed.

Keywords: electromechanical device, piezoceramic electroacoustic transducer, strength, mechanical loads, electrical loads, thermal loads, sealing, construction.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дрозденко О.І., Дрозденко К.С., Лейко О.Г. Конструювання п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів. Урахування експлуатаційних навантажень: Монографія. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 157 с. ISBN: 978-613-5-82752-1.

Особистий внесок здобувача: розділи 2 та 4 монографії.

2. N.V. Bogdanova, A.G. Leiko, S.A. Naida, A.I. Drozdenko / Cylindrical Piezoceramic Radiator as a Complex Dynamic System, J. Nano- Electron. Phys. 11 No 6, 06011-1 – 06011-7 (2019). (Scopus Q3, Категорія «А») DOI: 10.21272/jnep.11(6).06011

Особистий внесок здобувача: проведення розрахунків параметрів акустичних полів випромінювачів та аналіз їх впливу на конструкції електроакустичних приладів.

3. V. Didkovskyi, S. Naida, O. Drozdenko, K. Drozdenko Experimental researching of biological objects noninvasive passive acoustothermometry features. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, [S.l.], v. 1, n. 5 (103), p. 6-12, feb. 2020. (Scopus Q3, Категорія «А»). DOI: 10.15587/1729-4061.2020.192594

Особистий внесок здобувача: розробка конструкції електроакустичного перетворювача, розрахунки, моделювання.

4. O. Leiko, N. Bogdanova, O. Bogdanov, O. Drozdenko, K. Drozdenko. Possibilities of Controlling the Dynamic Properties of a Cylindrical Piezoceramic Acousto-electronic Device with Two-frequency Resonance, J. Nano- Electron. Phys, 12 No 6, 06003 (2020) (Scopus Q3, Категорія «А»). DOI: 10.21272/jnep.12(6).06003.

Особистий внесок здобувача: проведення розрахунків параметрів акустичних полів циліндричних випромінювачів та аналіз їх впливу на конструкції електроакустичних приладів.

5. Naida S.A., Onykienko Y.O., Drozdenko O.I., Smolenska O.I., Baran V.S., Iakunina N.O. Analysis of the influence of load inductance on nonlinear distortions of a class D amplifier caused by «dead time». Electrical Engineering & Electromechanics, 2021, no. 3, pp. 32-37. (Scopus Q3, WoS, Категорія «А»). DOI:10.20998/2074-272X.2021.3.05

Особистий внесок здобувача: розробка систем живлення конструкцій приладів, аналітичні розрахунки.

6. Drozdenko K., Naida S., Drozdenko O., Damarad A., Pareniuk D., Vakulenko L., Adaricheva Z. (2022) The Influence of a Low-Frequency Musical Fragment on the Neural Oscillations, Archives of Acoustics, 47 (2): 169-179, doi: 10.24425/aoa.2022.141647 (Scopus Q3, WoS). DOI: 10.24425/aoa.2022.141647.

Особистий внесок здобувача: розробка вимірювальної системи та алгоритмів експериментального дослідження.

7. Дрозденко Е.С. Пространственное распределение внутренней температуры биологического объекта при решении задач акустотермометрии / Е.С. Дрозденко, А.И. Дрозденко // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – 2014, Вип. 7 (123). – С. 24-27. (Категорія «Б»). ISSN 1681-7710.

Особистий внесок здобувача: постановка та розв'язок задачі визначення теплових полів об'єктів аналітичними методами.

8. Дрозденко О.І. Метод розрахунку температур розігріву конструкцій циліндричних електроакустичних перетворювачів компенсованого типу, герметизованих метало-полімерними шарами / О.І. Дрозденко // Electronics and Communications. – 2014, Vol. 19, №3(80) – Р. 88-93. (Категорія «Б»). DOI:10.20535/2312-1807.2014.19.3.141478.

9. Владимирский А.А. Модернизированный термоакустический течеискатель А-10Т2 / А.А. Владимирский, И.А. Владимирский, А.И. Дрозденко // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці НАН України. – 2014, вип. 70. – С. 93-97. (Категорія «Б»). ISSN 2309-7655.

Особистий внесок здобувача: розрахунок теплових полів та розробка елементів конструкції термоакустичного течешукача.

10. Лейко О.Г. Перетворювачі для рідинних акустичних технологій і конструкторські шляхи нейтралізації гідростатичного тиску, що діє на них / О.Г. Лейко, О.І. Дрозденко // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – 2015. – Вип. 1 (126). – С. 37-40. (Категорія «Б»). ISSN 1681-7710.

Особистий внесок здобувача: аналіз зовнішніх експлуатаційних впливів на елементи конструкції та розробка заходів для зміцнення циліндричних електроакустичних приладів.

11. Дрозденко О.І. Теплові поля силових конструкцій циліндричних п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів / О.І. Дрозденко // Electronics and Communications. – 2015, Vol. 20, №1(83) – Р. 65-72. (Категорія «Б»). DOI:10.20535/2312-1807.2015.20.1.47709

12. Дрозденко А.И. Излучение максимальной акустической мощности системами гидроакустических цилиндрических пьезокерамических преобразователей с окружной поляризацией / А.И. Дрозденко, А.Г. Лейко // Microsystems, Electronics and Acoustics, 2018, vol. 23, no. 2 – Р. 58 - 65. (Категорія «Б»). DOI: 10.20535/2523-4455.2018.23.2.121316.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, знаходження розв'язку в загальному вигляді.

13. Дрозденко О.І. Сучасні підходи до конструювання гідроакустичних антен корабельних гідроакустичних станцій / А.В. Дереп, В.В. Джаназян, О.Г. Лейко, О.І. Дрозденко // Озброєння та військова техніка. – 2019, №2(22). – С. 93-98. (Категорія «Б»). DOI:10.34169/2414-0651.2019.2(22).93-98.

Особистий внесок здобувача: аналіз зовнішніх експлуатаційних впливів на елементи конструкції та розробка заходів для зміцнення електромеханічних приладів.

14. Дрозденко О.І. Механічна міцність гідроакустичних циліндричних випромінювачів з внутрішніми екранами / А.В. Дереп, О.Г. Лейко, О.І. Дрозденко, А.О. Святненко // Озброєння та військова техніка. – 2019, №3(23). – С. 110-116. (Категорія «Б»). DOI:1034169/2414-0651.2019.3(23).110-116.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, аналіз впливу екрану на механічну міцність елементів конструкції електромеханічних приладів.

15. Дереп А.В. Властивості електричних полів гідроакустичних випромінювачів з внутрішніми екранами / А.В. Дереп, О.Г. Лейко, О.І. Дрозденко, А.О. Святненко // Озброєння та військова техніка. – 2019, №4(24). – С. 41-49. (Категорія «Б»). DOI:1034169/2414-0651.2019.4(24).41-48.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, аналіз впливу екрану на електричну міцність електромеханічних приладів.

16. Дрозденко О.І. Забезпечення теплового режиму роботи стержневих конструкцій п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів / О.І. Дрозденко, К.С. Дрозденко, О.Г. Лейко, Л.В. Перчевська // Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2019, №24(5). – С. 56-63. (Категорія «Б»). DOI: 10.20535/2523-4455.2019.24.5.190452.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, розробка фізичної та математичної моделі, аналітичні розрахунки.

17. Дерепа А.В. Властивості гідроакустичних випромінювачів з внутрішніми екранами в залежності від характеристик екранів. / А.В. Дерепа, О.Г. Лейко, О.І. Дрозденко, А.О. Святненко // Озброєння та військова техніка. – 2020, №.1 (25) – С. 89-95. (Категорія «Б»). DOI: 1034169/2414-0651.2020.1(25).89-95.

Особистий внесок здобувача: розробка фізичної моделі, аналітичні розрахунки.

18. Дрозденко О.І. Про вплив конструкційних елементів гідроакустичних випромінювачів з внутрішніми екранами на акустичні властивості гідроакустичних станцій / О.І. Дрозденко, А.В. Дерепа, О.Г. Лейко, А.О. Святненко // Озброєння та військова техніка. – 2020, №.2 (26). – С. 112-118. (Категорія «Б»). DOI: 1034169/2414-0651.2020.2(26).112-118.

Особистий внесок здобувача: розробка фізичної моделі, розрахунок конструкційних елементів випромінювачів.

19. Дерепа А.В. Про вплив фізичних характеристик заповнюючих рідин на електричні властивості гідроакустичних випромінювачів з внутрішніми екранами. / А.В. Дерепа, О.Г. Лейко, О.І. Дрозденко, К.А. Шишкова, В.В. Каніщев // Озброєння та військова техніка. – 2020, №3(27). –С. 77-84. (Категорія «Б»). DOI:1034169/2414-0651.2020.3(27).77-84.

Особистий внесок здобувача: розробка фізичної моделі, розрахунок конструкційних елементів випромінювачів.

20. Дрозденко О.І. Випромінювання звуку циліндричним гідроакустичним перетворювачем в присутності екрану з електрично керованими акустичними властивостями. / О.І. Дрозденко, А.В. Дерепа, О.Г. Лейко, О.В. Богданов, О.І. Нижник // Озброєння та військова техніка. – 2020, №4(28). – С. 83-88. (Категорія «Б»). DOI:1034169/2414-0651.2020.4(28). 83-88.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, аналіз впливу екрану на електричну міцність електромеханічних приладів, розрахунки.

21. Позднякова О.М. Випромінювання звуку циліндричним п'єзокерамічним гідроакустичним перетворювачем з динамічно керованими параметрами / О.М. Позднякова, О.І. Дрозденко, А.В. Дереп, І.О. Ластівка, О.Г. Лейко, Осадча А.К. // Озброєння та військова техніка. – 2021, №1(29). – С. 64-70. (Категорія «Б»). DOI:1034169/2414-0651.2021.1(29).64-70.

Особистий внесок здобувача: розрахунки, аналіз впливу екрану на електричну міцність електромеханічних приладів.

22. Perchevska, L., Drozdenko, O., Drozdenko, K., Leiko, O. (2021). Study of the influence of the housing on the cooling efficiency of the piezoceramic electroacoustic langevin-type transducer. Technology Audit and Production Reserves, 3 (1 (59)), 50–55. (Категорія «Б»). DOI:10.15587/2706-5448.2021.231279

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, розробка фізичної та математичної моделі, аналітичні розрахунки.

23. L. Perchevska, O. Drozdenko, and K. Drozdenko, “Shifting the operating frequency of the piezoceramic electroacoustic transducer langevin type using passive cooling methods” ScienceRise, no. 4, pp. 3–10, Aug. 2021, DOI: 10.21303/2313-8416.2021.002019.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, розробка фізичної та математичної моделі, аналітичні розрахунки

24. Патент України на винахід № UA 121721 C2, Україна, МПК G 01 S 7/52. Глибоководний звуковідбиваючий екран / Дереп А.В., Лейко О.Г., Аверічев І.В., Кочарян О.О., Позднякова О.М, Коцюба В.С., Олійник К.А., Джаназян В.В, Дрозденко О.І., № а201900433; заявл. 16.01.2019, опубл. 10.07.2020. Бюл. № 13/2020 р.

Особистий внесок здобувача: проведення патентних досліджень, розробка опису винаходу.

25. Патент України на винахід № UA 124067 C2, Україна, МПК G 01 S 7/52. Гідроакустичний випромінюючий тракт / Дереп А.В., Лейко О.Г., Кочарян О.О,

Майборода О.О., Блінцов О.В., Дрозденко О.І., Богданова Н.В., Ісаєнко О.С., а 201900432; заявл. 16.01.2019, опубл. 14.07.2021. Бюл. № 28.

Особистий внесок здобувача: проведення патентних досліджень, моделювання, розробка опису винаходу.

26. Пат. на кор. модель 129345 Україна, МПК G 01 S 7/52. Акустична планарна антенна решітка з малими боковими полями / Дерепка А.В., Лейко О.Г., Блінцов О.В., Аверічев І. В., Кочарян О.О., Позднякова О.М., Бережний О.М., Дрозденко О.І., Святненко А.О., Комаров В.О., Куровська Т.Ю. – № u201805064; заявл. 08.05.2018, опубл. 25.10.2018. Бюл. № 20, 2018р.

Особистий внесок здобувача: проведення патентних досліджень, розробка опису корисної моделі.

27. O. Drozdenko, K. Drozdenko, and L. Perchevska, "Features of thermal fields calculation for cylindrical piezoceramic transducers with compensated design", 2018 IEEE Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering Congress (UKRSYW), Conference Proceedings, pp. 44–47, 2–6 October, 2018, Kyiv, Ukraine.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, знаходження розв'язку в загальному вигляді.

28. O. Drozdenko, K. Drozdenko, L. Perchevska, "Methods for analyzing the thermal field of rod type piezoceramic electroacoustic transducers", 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Conference Proceedings, pp. 750–753, 16–18 April, 2019, Kyiv, Ukraine. (Scopus).

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, розробка фізичної та математичної моделі, аналітичні розрахунки.

29. O. Leiko, O. Drozdenko, A. Derepa and A. Sviatnenko, "Acoustic Remote Sensing Piezoceramic Transducers with Internal Screen," 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 710-713, doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088849. (Scopus).

Особистий внесок здобувача: розробка фізичної та математичної моделей електроакустичних приладів.

30. O. Drozdenko, K. Drozdenko, O. Leiko and L. Perchevska, "The Thermal Fields Analysis of Sealed Cylindrical Piezoceramic Electroacoustic Transducers Compensated Construction," 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 815-819, doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088757 (Scopus).

Особистий внесок здобувача: постановка та розв'язок задачі визначення теплових полів електроакустичних приладів аналітичними методами, моделювання.

31. Дрозденко А.И. Методы устранения температурных напряжений в конструкциях электроакустических преобразователей. / А.И. Дрозденко, А.М. Попова // Zbiór raportów naukowych. "Inżynieria i technologia. Teoria. Praktyka". Wykonane na materiałach Międzynarodowej NaukowoPraktycznej Konferencji 29.11.2014 - 30.11.2014 roku. Szczecin. – Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour». – 2014. – str.61-62.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, розрахунки, аналіз результатів.

32. Дрозденко А.И., Дрозденко Е.С., Быкова Л.В. Объемная мощность источников тепловыделения в конструкциях электроакустических преобразователей // Inżynieria i technologia. Współczesne problemy i perspektywy rozwoju (29.04.2016 - 30.04.2016): Zbiór raportów naukowych. - Krakow, 2016. - с. 50-52.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, розробка фізичної моделі, аналіз результатів.

33. Дрозденко А.И., Перчевская Л.В. Определение теплового поля пьезокерамических электроакустических преобразователей стержневого типа // Пятая Международная научно-техническая конференция «Информационные

проблемы теории акустических, радиоэлектронных и телекоммуникационных систем IPST-2016». (29.11 – 01.12.2016.) Харьков 2016.

Особистий внесок здобувача: постановка та розв'язок задачі визначення теплових полів приладів аналітичними методами, аналіз результатів.

34. Дрозденко А.И., Перчевская Л.В. Определение тепловых полей цилиндрических пьезокерамических преобразователей // Inżynieria i technologia. Badania podstawowe i stosowane: wyzwania i wyniki (30.05.2017 - 31.05.2017 roku): Zbiór raportów naukowych. - Gdańsk, 2017. – С. 67-69.

Особистий внесок здобувача: постановка та розв'язок задачі визначення теплових полів циліндричних приладів, аналіз результатів.

35. Дрозденко О.І., Кулик Т.А. Вибір матеріалів для конструкції ультразвукового накінечника факоемульсифікатора // Міжнародна наукова інтернет-конференція "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення" (випуск 21) (12.07.2017) – Тернопіль, 2017.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, аналіз результатів.

36. Дрозденко О.І., Перчевська Л.В. Візуалізація теплових полів електроакустичних перетворювачів з використанням комп'ютерних технологій моделювання // "Мультимедійні технології в освіті та інших сферах діяльності" (16-17.11.2017) – Київ, НАУ 2017.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, моделювання, аналіз результатів.

37. Дрозденко О.І., Галайба М.В. Ультразвуковий генератор з системою автоматичного регулювання частоти // Science, research, development. Technics and technology. – Zbiór artykułów naukowych recenzowanych. Warszawa, 2018. - с. 43-45. ISBN: 978-83-66030-04-6.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі, розробка алгоритмів роботи систем живлення електроакустичних приладів.

ЗМІСТ

ВСТУП	30

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУЮВАННЯ ПІДВОДНИХ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ НА СУЧАСНОМУ ЕТАПІ ЇХ РОЗВИТКУ	39

1.1. Специфічні особливості підводних електроакустичних приладів і систем, які потрібно враховувати при розробці їх конструкцій.	39

1.2. Особливості фізичних полів підводних електроакустичних приладів та систем, які важливі для їх врахування при конструюванні цих пристроїв.....	42

1.3. Можливі технічні шляхи керованого зменшення впливу факторів, які визначають міцність конструкцій електроакустичних приладів і систем.	45

1.4. Можливі підходи до розрахункового забезпечення врахування впливу обмежуючи факторів при конструюванні електроакустичних приладів і систем.	48

1.5. Аналіз існуючого стану розрахункового забезпечення конструювання підводних електричних приладів і основних напрямків його розвитку.	62

Висновки до розділу 1	64

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНІ ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ НАВАНТАЖЕННЯ ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЇХ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИ КОНСТРУЮВАННІ ПІДВОДНИХ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ ПРИЛАДІВ	67

2.1. Існуючі підходи до конструювання електроакустичних приладів різних типів.....	67
2.2. Експлуатаційні навантаження і вимоги до конструкторсько-технологічного забезпечення їх реалізації.	76
2.3. Навантаження, які створюються режимом випромінювання звуку (кавітаційні, механічні динамічні, електричні, теплові).....	85
2.4. Зовнішній статичний тиск і конструкторські способи нейтралізації його впливу.....	104
2.5. Довготривала механічна міцність конструкцій електроакустичних приладів і конструкторські рішення щодо її забезпечення	111
2.6. Довготривала електрична міцність конструкцій електроакустичних приладів і конструкторські рішення по її забезпеченню	127
Висновки до розділу 2.	142

РОЗДІЛ 3

МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКІВ МЕХАНІЧНОЇ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ПІДВОДНИХ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ ПРИЛАДІВ	145
3.1. Загальні положення.....	145
3.2. Механічні статичні напруження, що створюються в конструкціях зовнішнім тиском	148
3.3. Механічні динамічні напруження, які виникають при коливаннях активних елементів електроакустичних приладів.....	157
3.4. Механічні напруження, які створюються в активних елементах електроакустичних приладів при їх зміцнюванні.	169

3.5. Практичне застосування методик розрахунків механічної міцності конструкцій електроакустичних приладів.....	181
Висновки до розділу 3	187
 РОЗДІЛ 4	189
МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ПІДВОДНИХ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ ПРИЛАДІВ	189
4.1. Загальні положення.....	189
4.2. Розрахунки вологостійкості активних елементів в конструкціях гідроакустичних приладів та їх вплив на електричну міцність конструкцій .	196
4.3. Розрахунки дифузії рідини крізь елементи герметизації конструкцій гідроакустичних приладів та їх вплив на електричну міцність конструкцій .	204
4.4. Методики розрахунків герметичності конструкцій гідроакустичних приладів різних типів та впливу герметичності на електричну міцність конструкції.....	217
4.5. Методи розрахунків концентрації парів рідини в конструкціях гідроакустичних приладів різних типів та вплив парів рідини на електричну міцність конструкцій	233
Висновки до розділу 4.	247
 РОЗДІЛ 5	249
МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКІВ ТЕПЛОВОЇ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ПІДВОДНИХ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ ПРИЛАДІВ	249
5.1. Теплові навантаження конструкцій випромінюючих гідроакустичних п'єзокерамічних приладів	249

5.2. Методи розрахункової оцінки температури розігріву конструкцій електроакустичних приладів.....	255
5.3. Визначення теплового поля конструкцій ПЕП аналітичними методами	258
5.4. Моделювання та експериментальні дослідження теплових полів конструкцій ПЕП.....	281
5.5. Експериментальні дослідження температури розігріву стержневого приладу.....	290
5.6. Забезпечення теплового режиму ПЕП конструкційними заходами	297
Висновки до розділу 5	309
 ВИСНОВКИ.....	 311
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	315
ДОДАТКИ.....	340

ВСТУП

Технічна акустика знайшла широке застосування в національному господарстві і обороні держави. Особливістю технічної акустики є те, що її електромеханічні (електроакустичні) прилади призначені для експлуатації з використанням трьох існуючих пружних середовищ – газоподібних, рідинних (є найбільш складними та агресивними) та твердих. Тому структура сучасної технічної акустики охоплює і інженерну діяльність (електротехніка, машинобудування будівництво), і мистецтво (музика), і науки про життя (медицина, фізіологія), і про Землю (геологія, океанографія). Конструювання електромеханічних приладів технічної акустики – складний процес, в результаті якого здійснюється технічна реалізація «в кожусі» принципового задуму розробників цих приладів. При цьому повинні бути збереженими принцип побудови конструкцій і основні розраховані параметри приладів. Крім того при розробці конструкцій необхідно врахувати і забезпечити впливи зовнішніх і внутрішніх умов експлуатації, технології виготовлення конструкцій і кількісні оцінки цих впливів на параметри електромеханічних приладів. Зрозуміло, що все це можливо здійснити при наявності відповідного розрахункового забезпечення конструювання зазначених приладів. На жаль, в вітчизняній технічній акустиці створення такого забезпечення становило і залишається суттєвою науково-технічною проблемою, відсутність розв'язку якої значно знижує якість створюваних акустичних виробів. Тому розв'язок цієї проблеми є актуальним завданням сьогодення.

Перший підхід до розв'язку цієї проблеми на тому науково-технічному рівні, що існував на той час, було зроблено в сімдесяті роки минулого століття такими вченими як Грінченком В.Т., Улітком А.Ф., Гузем О.М., Кубенком В.Д., Шульгою О.М., Зіньковським А.П., та іншими. Але з того часу багато що змінилося в науково-технічному плані, пов'язаному з технічною акустикою.

Зусиллями Грінченка В.Т., Улітка А.Ф., Шульги О.М. була встановлена зв'язаність таких фізичних полів як електричні, механічні та акустичні при перетворенні енергії в пристроях, побудованих з використанням п'єзоелектричних середовищ. При формуванні такими пристроями та системами з них акустичних полів в оточуючих пружних середовищах Грінченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т., Лейко О.Г., Коржик О.В., Кубенко В.Д., Воскобійника В.А. та інші встановили появу і вивчили взаємодії акустичних полів, створюваних конструктивними елементами перетворювачів і систем і фізично обумовлену багатократним випромінюванням і перевідбиттям звукових хвиль цими елементами. Врахування взаємодії фізичних полів різної природи з пружним середовищем при перетворенні енергії в п'єзокерамічних середовищах, акустичних полів в пружних середовищах при їх формуванні та процесів перетворення і формування енергії, виконані в роботах Сокол Г.І., Лейка О.Г., Коржика О.В., Кубенка В.Д., Дерепи А.В., Дідковського В.С., Блінцова В.С., Найді С.А. їх колег та учнів, суттєво змінили існуючі фізичні уявлення про електромеханічні коливальні процеси в п'єзокерамічних випромінювачах різних типів. Зокрема були встановлені: залежності амплітуд коливальних швидкостей випромінювачів від характеру їх електричного збудження; робочих частотних діапазонів та інших фізичних параметрів; перетворення одномодових механічних коливальних систем в багатомодові з появою та значним зниженням нових резонансних частот і суттєвим збільшенням амплітуд коливальних швидкостей на них. В той же час не знайшло практичного застосування цих нових знань в задачах конструювання гідроакустичних пристроїв у зв'язку з відсутністю розробленого на їх основі розрахункового забезпечення конструкторських розробок та значній теоретичній складності цих питань.

Таким чином, можливо констатувати, що на сьогодні актуальність та практична значимість роботи, що пропонується, обумовлені необхідністю 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, які мають місце в цих конструкціях в умовах різноманіття пружних середовищ.

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.

Зв'язок роботи з науковими програмами планами темами.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі акустичних та мультимедійних електронних систем Національного технічного університету України «КПІ імені Ігоря Сікорського» в межах держбюджетної конкурсної теми Міністерства освіти та науки України №2411-п "Новий широкосмуговий автоматизований портативний електроакустичний апаратно-програмний комплекс з підвищеними точністю і безпечністю для ранньої диференційної аудіологічної експрес-діагностики в медицині" (номер державної реєстрації: № 0121U109609) та договору з ДП "Київський НДІ Гідроприладів" (Державний концерн "Укроборонпром") №155/16 від 22.11.2016 р., (додаткова угода №4 від 11.06.2019р.) "Широкосмугові випромінюючі та приймаючі електроакустичні тракти акустичних приладів".

Мета і завдання дослідження

Метою дисертації є розробка теоретичних основ розрахунку та фізико-технічних засад конструювання електромеханічних приладів акустики пружних середовищ різного призначення 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.

Досягнення поставленої мети потребує розв'язку таких задач.

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 і 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 цими приладами.

Предметом дослідження є електромеханічні прилади 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.

Наукова новизна одержаних результатів

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 заданням 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.

5. Результати дисертаційної роботи впровадженні:

- 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.) "Широкосмугові 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».

Всі впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджені відповідними актами.

Особистий внесок здобувача.

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.

Публікації

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 37 наукових праць з них 2 самостійні роботи, 22 роботи опубліковано у фахових журналах, 1 монографія, 11 опубліковано в матеріалах і тезах доповідей; оригінальні рішення захищені 3 патентами України.

Структура і об'єм дисертації

Дисертація складається із вступу, 5 розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 341 сторінку, 85 рисунків, список використаних джерел з 198 найменувань займає 24 сторінки.

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУЮВАННЯ ПІДВОДНИХ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ НА СУЧАСНОМУ ЕТАПІ ЇХ РОЗВИТКУ

1.1. Специфічні особливості підводних електроакустичних приладів і систем, які потрібно враховувати при розробці їх конструкцій.

Підводні електроакустичні прилади та системи мають ряд специфічних особливостей які поділяють на зовнішні та внутрішні. До зовнішніх відносяться особливості, пов'язані з умовами рідинних середовищ, в яких працюють конструкції цих пристроїв. Це: взаємодія конструкцій з оточуючим рідним середовищем, яке в загальному випадку є агресивним; наявність дії гідростатичного тиску на конструкції; наявність зворотної дії на конструкції рідинного середовища на збудження в ньому акустичного поля [1-6].

Внутрішні специфічні особливості полягають в наявності ряду фізичних полів які супроводжують процеси випромінювання і прийому звуку цими пристроями. До цих полів відносяться: електричні, механічні, акустичні і теплові. Із фізичних міркувань зрозуміло, що саме при випромінюванні акустичної енергії підводними електроакустичними приладами і системами кожне з цих полів обумовлює появу фізичних факторів, які обмежують можливості їх конструкцій щодо випромінювання великих потужностей, оскільки в залежності від фізичних особливостей застосування цих пристроїв їх конструкції можуть працювати протягом тривалого часу (десятиліттями) в умовах високого зовнішнього тиску (десятки мегапаскалів) в агресивних середовищах при дії на них значних електричних напруг (кілька тисяч вольт).

Підводячи підсумок наведеному, можливо зробити висновок, що при розробці конструкцій електроакустичних приладів і систем потрібно враховувати

всі ті обмеження, які створюються кожним із наведених вище полів. Визначимо найбільш впливові з цих обмежень.

При випромінюванні великих потужностей в акустичних полях електроакустичних приладів і систем на поверхні приладів в їх ближній зоні створюють великі значення акустичних тисків. Завдяки цьому у від'ємний напівперіод в цих місцях виникають розрідження з дуже великими силами розриву. Ці сили можуть перевищувати сили зчеплення молекул в середовищах, в які здійснюється випромінювання цих великих потужностей. Виникає явище кавітації, при якому створюються місцеві розриви середовища з утворенням каверн, які наповнюються паром і повітрям. В наступний додатній напівперіод ці каверни схлопуються, вивільняючи великі сили. Ці сили обумовлюють механічну руйнацію випромінюючої поверхні конструкцій електроакустичних приладів. Крім того, при появі кавітації збільшення закачуваної в прилади електричної потужності не обумовлює збільшення випромінюваної акустичної потужності, оскільки кавітаційні пухирці, охоплюючи випромінюючу поверхню приладів, діють як ефективний акустично м'який екран. При цьому відбувається відбиття випромінених сигналів в сторону випромінюючої поверхні приладів. Наслідком цього є зростання механічних напружень в конструкціях електроакустичних приладів, яке може призвести до механічного руйнування їх конструкцій.

Поріг кавітації визначається величиною питомої акустичної потужності. Він залежить від багатьох фізичних факторів, вплив яких в деталях досліджено в роботах [4, 7-14]. Там же визначені і технічні шляхи зменшення впливу кавітації на конструкції електроакустичних приладів.

Таким чином, обмежуючим фізичним фактором випромінювання великих потужностей зі сторони акустичного поля, який потрібно враховувати при розробці конструкцій електроакустичних приладів і систем, є кавітаційні явища.

Наявність механічного поля при випромінюванні потужності електромеханічними приладами є ознакою появи фізичних факторів, які

обмежують величину випромінювання. Особливо важливим є встановлення їх при використанні в якості активного матеріалу п'єзокераміки різних складів [3, 4, 15-18]. Це пов'язане з тим, що п'єзокераміка відноситься до крихких матеріалів, які бояться розтягуючих зусиль. Такі зусилля виникають при дії як статичних, так і динамічних навантажень. До статичних відносяться механічні напруження в конструкціях приладів, які створюються зовнішнім тиском, зокрема гідростатичним. Такі напруження виникають в тих конструкціях електромеханічних приладів, де зовнішній тиск трансформується в одно-, двох- або трьохосовий напружений стан.

Електроакустичні прилади відносяться до конструкцій, в яких в процесі експлуатації при електричному збудженні їх гармонічним сигналом виникають циклічні динамічні напруження. Вони тим більші, чим більша питома потужність випромінювання приладів, а, відтак, і їх коливальна швидкість [3, 4, 19-21].

Саме наявність останнього фізичного фактора накладає принципові обмеження на величину максимальної акустичної потужності, що випромінюється електроакустичними приладами і системами, активним елементом яких є п'єзокераміка, зі сторони їх механічного поля.

Як вже відмічалось, максимальна акустична потужність, що випромінюється конструкціями електроакустичних приладів і систем, визначається максимальною електричною потужністю, яку можна «закачати» в ці прилади при їх збудженні електричним полем. Зрозуміло, що величина цієї електричної потужності обмежується допустимими значеннями напруженості електричного поля. Саме їх величина є тим обмежувальним фізичним фактором зі сторони електричного поля, який підлягає обов'язковому врахуванню при розробці конструкцій електроакустичних приладів і систем при випромінюванні ними максимальної потужності.

Наявність при функціонуванні електроакустичних приладів процесу перетворення електричної енергії в механічну, а механічної – в акустичну

обов'язково породжує появу теплового поля, обумовлюючого розігрів конструкцій приладів. Температура розігріву тим більша, чим більша випромінювана потужність. Максимальна потужність породжує і максимальну температуру розігріву конструкцій. А це створює небезпеку не тільки досягнення конструкціями температури точки Кюрі і втрати п'єзокерамікою приладів ефекту електрострикції, а й появою ще ряду ефектів, руйнуючих конструкції електроакустичних приладів – виникнення температурних механічних напружень, розплавленням внутрішніх акустичних екранів у виглядів пінополістиролів та ін. Тому температура розігріву є обмежувальним фактором зі сторони теплового поля, який підлягає обов'язковому врахуванню при конструюванні випромінювачів великої потужності.

1.2. Особливості фізичних полів підводних електроакустичних приладів та систем, які важливі для їх врахування при конструюванні цих пристроїв.

Як відомо [3-6, 19-21], підводні електроакустичні прилади та системи виконують дві функції – функцію перетворення одного виду енергії в інші і функцію формування акустичного поля в оточуючому середовищі. Кожна з цих функцій має свої особливості. При цьому слід зауважити, що основним активним матеріалом, який використовується в сучасних електроакустичних приладах і системах для перетворення одного виду енергії в інші, є п'єзоелектрична кераміка. Відомо [3, 18, 22-24], що пружні середовища з п'єзоелектричним ефектом характеризуються взаємним зв'язком між електричними і механічними процесами, що протікають в них. Відомо також, що між механічними процесами в п'єзокерамічних тілах і процесами поширення звукових хвиль пружних середовищах, які оточують ці тіла, теж існує взаємний зв'язок. Останні

характеризуються рядом особливостей, які суттєво впливають на акустичні навантаження п'єзокерамічних тіл, а відтак, і на механічні процеси, що протікають в них. Природно, що через ці механічні процеси особливості акустичного навантаження п'єзокерамічних тіл суттєво впливають і на електричні процеси в них.

Таким чином, процес перетворення енергії в п'єзокерамічних електроакустичних приладах і системах характеризується взаємним зв'язком між електричними, механічними і акустичними полями в них.

Свої особливості має і процес формування акустичного поля електроакустичними приладами і системами. Їх фізичною суттю є поява в цих системах і в приладах багатократного обміну випроміненими і відбитими звуковими хвилями [19-21, 24-28]. Природно, що ця взаємодія акустичних полів, створюваних елементами систем і приладів, впливає на їх акустичне навантаження, а через нього і на механічні і електричні поля електроакустичних приладів і систем. Таким чином, функція формування акустичних полів електроакустичними приладами і системами відзначається появою акустичної взаємодії цих пристроїв. Природно, що нові знання, отримані в останні десятиліття і пов'язані із встановленням взаємного зв'язку між:

- електричними, механічними і акустичними полями в процесі перетворення енергії;
- акустичними полями елементів систем і приладів в процесі формування ними акустичних полів;
- процесами перетворення енергії і її формування в оточуючих середовищах між собою через формування акустичного навантаження приладів і систем, суттєво і принципово, в ряді випадків, змінили існуючі уявлення про функціонування підводних електроакустичних приладів і систем і повинні бути враховані при їх конструюванні.

Ці зміни в розумінні характеру і процесів функціонування досліджуваних пристроїв полягають в наступному.

По-перше, взаємний зв'язок між визначеними вище полями і процесами при випромінюванні і прийомі звуку певним чином залежать від характеру організації електричного навантаження електроакустичних приладів і систем. Дійсно, цей характер визначає акустичну взаємодію елементів цих пристроїв. Останнє формує акустичне навантаження п'єзокерамічних електроакустичних приладів і систем. В свою чергу це навантаження впливає на механічні і електричні поля п'єзокерамічних тіл.

По-друге, встановлення фактів взаємного зв'язку фізичних полів і процесів, що діють при випромінюванні і прийомі звуку, від характеру організації електричного збудження електроакустичних приладів і систем дозволяє при їх конструюванні визначати можливі технічні шляхи керованого зменшення впливу фізичних факторів, які впливають на характеристики міцності створюваних конструкцій.

По-третє, на практиці має місце велика різноманітність особливостей електричного і акустичного навантажень електроакустичних приладів і систем. Це змушує при виконанні конструкторських робіт з метою пошуку раціональних рішень в кожному конкретному випадку вивчати і кількісно оцінювати взаємні зв'язки між електричними, механічними і акустичними процесами в них.

Це і буде складати основу розрахункового забезпечення конструювання підводних електроакустичних приладів і систем на сучасному етапі їх проектування.

1.3. Можливі технічні шляхи керованого зменшення впливу факторів, які визначають міцність конструкцій електроакустичних приладів і систем.

При визначенні можливих технічних шляхів керованого зменшення впливу факторів, які визначають характеристики міцності електроакустичних приладів, потрібно враховувати дві обставини. Перша обставина пов'язана з тим, що серед чотирьох фізичних обмежуючих факторів, наведених в попередньому підрозділі, два є первинними, а два – вторинними. Друга обставина полягає в тому, працює конструкція випромінюючого приладу самостійно чи у складі системи.

До первинних факторів, які обмежують характеристики міцності конструкцій, слід віднести збуджуючу електричну напругу та величину коливальної швидкості випромінюючих поверхонь електромеханічних приладів. Електрична напруга є параметром електричного поля, який визначає максимальну електричну енергію, закачувану в конструкцію випромінюючого приладу. Її величина обмежена можливостями елементів конструкції цього приладу на електричний пробій.

Коливальна швидкість випромінюючої поверхні є параметром механічного поля, який визначає динамічні механічні напруження, що виникають в елементах конструкції електроакустичного приладу. Її максимальні значення обмежені максимальними значеннями напружень розтягування, які витримують елементи конструкції. Обидва названі параметри визначають максимальну питому потужність, якої можна досягти в конструкції електроакустичного випромінюючого приладу без його виходу з ладу.

Два інші фізичні фактори, які обмежують міцність конструкції є вторинними, оскільки їх вплив і наслідки цього впливу на конструкції приладів визначаються величиною наведеної вище максимальної питомої потужності.

Розглянемо тепер більш детально вплив другої обставини. Її фізичною основою є багатократний обмін випроміненими та відбитими звуковими хвилями

в електроакустичних системах випромінювання. Природньо, що при роботі електроакустичного приладу поза системою цей обмін відсутній. Це означає, що при збільшенні збуджуючої електричної напруги, яка подається на конструкцію електроакустичного приладу, пропорційно збільшується акустичний тиск і коливальна швидкість коливальної поверхні. При цьому поява факторів, що обмежують міцність конструкції самостійно працюючого електроакустичного приладу, має місце при перевищенні:

- амплітудою збуджуючої напруги допустимого значення електричної міцності елементів його конструкції;
- коливальною швидкістю значення, якому відповідає межа механічної міцності матеріалів конструкції;
- акустичним тиском – порогу кавітації робочого середовища;
- температурою розігріву конструкції приладу точки Кюрі п'єзокераміки та температури, при якій в конструкції виникають руйнівні температурні механічні напруження.

Але не все так просто з конструкціями електроакустичних приладів при їх самостійній роботі. Якщо конструкція приладу складна і включає в себе крім п'єзокерамічних елементів і інші елементи, наприклад, акустичні екрани, то між ними теж відбувається багатократний обмін звуковими хвилями [19-21, 26-34]. В цих випадках при конструюванні таких приладів треба враховувати рекомендації, встановлені нижче для систем електроакустичних приладів.

Як вже відмічалось, по-перше, максимальна потужність акустичного випромінювання системою електроакустичних приладів в першу чергу визначається можливостями конструкцій приладів системи прийняти й перетворити необхідну для цього максимальну електричну потужність. А це залежить від електричної міцності конструкцій електроакустичних приладів, тобто першого обмежуючого фактору.

По-друге, багатократний обмін в акустичному полі системи випроміненими і відбитими від її елементів звуковими хвилями впливає на акустичне навантаження конструкцій цих елементів. У зв'язку з цим коливальна швидкість приладів системи визначається як характеристиками їх електричного збудження, так і характером акустичного навантаження цих приладів в системі. Звідси витікає необхідність при розробці конструкцій приладів сумісного розгляду впливу первинних електричних і механічних обмежуючих фізичних факторів, оскільки тільки на цьому шляху можливо визначити раціональні підходи при розробці конструкцій приладів з максимальною енергетичною ефективністю при роботі у складі системи. При цьому із фізичних уявлень зрозуміло, що в принципі існують три можливі підходи [3, 4, 34-40].

Перший підхід, який в даний час набув найбільшого поширення в зв'язку з простотою своєї технічної реалізації електронної частини електроакустичних приладів, полягає у збудженні всіх випромінювачів системи однаковою електричною напругою, що дозволяє уникнути проблем з електричною міцністю системи. Однак, як показали останні дослідження [20, 25, 26, 35-40], при такому підході, через наявність взаємодії випромінювачів в системах по акустичному полю, у зв'язку з роботою їх в області основного механічного резонансу випромінювачів, і порівнюваністю розмірів випромінювачів з довжиною хвилі на робочій частоті виникають суттєві проблеми з механічною міцністю п'єзокерамічних випромінювачів. Вони обумовлені появою значної різниці в амплітудах коливальних швидкостей випромінювачів у складі системи. Ці відмінності не дозволяють повністю реалізувати потенційні можливості системи з випромінюваної потужності, оскільки їх окремі випромінювачі набувають через акустичну взаємодію коливальну швидкість, гранично допустиму або більшу з точки зору їх механічного руйнування.

Другий підхід пов'язаний із забезпеченням такого електричного збудження елементів системи, при якому всі її випромінювачі матимуть однакову

коливальну швидкість. Цей підхід забезпечує задану механічну міцність випромінювачів системи, однак його технічна реалізація пов'язана з необхідністю збудження випромінювачів або від електронних генераторів з нескінченною електричною потужністю [39], що є нереальним, або від генераторів, які формують спеціальні амплітудно-фазові розподіли для кожного випромінювача системи. В обох випадках на перший план виходить проблема забезпечення електричної міцності елементів конструкцій системи.

Можливий і третій підхід, при якому здійснюється пошук таких електричних збуджень випромінювачів системи, при якому забезпечуються прийнятні рівні і механічної, і електричної міцностей елементів її конструкцій.

1.4. Можливі підходи до розрахункового забезпечення врахування впливу обмежуючи факторів при конструюванні електроакустичних приладів і систем.

Як показав аналіз, проведений в попередніх підрозділах, підходи до конструювання електроакустичних приладів і систем з максимальною міцністю конструкцій визначаються характером електричного збудження конструкцій цих приладів і систем. На сьогодні технічно можливі наступні три варіанти:

- всі випромінювачі збуджуються електричною напругою, величина якої не залежить від частоти в робочому діапазоні частот цих приладів і систем;
- всі випромінювачі збуджуються електричною напругою, величина якої є частотно залежною;
- одна частина випромінювачів системи збуджується електричною напругою не залежною від частоти, а інша частина – залежною від частоти в робочому діапазоні частот системи.

При першому варіанті контрольованим є електричний обмежуючий фактор, наприклад, у вигляді напруги електричного пробного елементів конструкцій приладів або системи в цілому. Це позитивна якість цього підходу до конструювання приладів і систем. Але суттєвим негативом цього варіанту електричного збудження є поява неконтрольованості механічного обмежуючого фактору у вигляді значного збільшення величин резонансних викидів коливальної швидкості в конструкціях окремих приладів електроакустичних систем. Це неконтрольоване збільшення амплітуд коливальної швидкості в конструкціях приладів системи обумовлює значне збільшення механічних динамічних напружень в п'єзокерамічних елементах конструкцій приладів і їх вихід за допустимі межі міцності цих елементів. Наслідком цього є необхідність обмеження амплітуд коливальної швидкості конструкцій приладів в системі до величин, виключаючих руйнування цих конструкцій [25-28, 30-33, 34, 41-46].

При другому варіанті електричного збудження контрольованим стає механічний обмежуючий фактор у вигляді величин коливальної швидкості випромінюючих поверхонь приладів у складі конструкцій системи. Ці величини можуть набувати значень, при яких максимальні динамічні напруження в конструкціях приладів знаходяться в межах їх допустимої механічної міцності. Ця позитивна якість цього підходу обумовлена рядом причин. По-перше, таке збудження забезпечує випромінювання системою акустичної енергії на допустимій межі, близькій до механічного руйнування конструкцій приладів. По-друге, електричне збудження приладів в електроакустичній системі, при якому всі прилади мають однакову коливальну швидкість, забезпечує більшу рівномірність акустичного поля системи в її ближній зоні [25, 28, 34, 43-46]. В свою чергу, таке акустичне поле забезпечує поріг кавітації, якому відповідає більша випромінювана потужність [3].

Негатив другого варіанту електричного збудження полягає у наступному. По-перше, електрична напруга збудження стає частотно залежною. Це значно

ускладнює технічну реалізацію електронних генераторів збудження та їх узгодження з електроакустичними приладами в випромінюючих трактах системи. По-друге, набуває чинності електричний обмежуючий фактор, який стає неконтрольованим.

При електричному збудженні третього варіанту зроблена спроба при конструюванні електроакустичних приладів і систем врахувати обидва обмежуючих фізичних фактори – і електричний, і механічний. Це компромісний варіант, якому притаманні і позитивні якості і недоліки, встановлені для першого і другого варіантів електричного збудження конструкцій електроакустичних приладів і систем. Технічно він реалізується таким чином, що одна частина електроакустичних приладів в системі збуджується напругою, незалежною від частоти, а інша частина – залежною від частоти. Першу частину утворюють прилади, в конструкціях яких можливі великі значення коливальних швидкостей, другу – прилади, в конструкції яких можливі електричні пробої.

Всі наведені вище технічні підходи потребують кількісних розрахунків по параметрам всіх трьох фізичних полів – електричному, механічному і акустичному. Розроблена на теперішній час математична процедура їх отримання полягає в наступному. Як вже відмічалось, в процесі випромінювання звуку системами п'єзокерамічних електроакустичних приладів фізично взаємодіють два процеси – перетворення енергії і її формування в оточуючих середовищах і три поля – електричне, механічне і акустичне.

В математичному відношенні ці взаємодії можуть бути враховані шляхом сумісного розв'язку трьох диференціальних рівнянь: хвильового рівняння поширення звуку в середовищах, електромеханічних коливань електроакустичних приладів, стану п'єзокераміки електроакустичних приладів в системі у вигляді рівнянь п'єзоефекту. Ці рівняння є загальними. Конкретизація математичної моделі досягається шляхом апріорного задання ряду конкретних

умов, у вигляді граничних та початкових умов, які формуються, виходячи із фізичної моделі досліджуваного об'єкта.

На сьогодні такий підхід найбільш розвинений для електроакустичних систем з першим варіантом електричного збудження приладів, що їх утворюють [19-21, 25-28, 30-33, 34, 36, 41-44, 47-51]. Він дозволив встановити максимальні значення коливальних швидкостей конструкцій електроакустичних приладів при незалежному від частоти їх електричному збудженні. Це дало можливість створити розрахункове забезпечення конструювання п'єзокерамічних електроакустичних випромінювачів в залежності від:

- конфігурації системи, кількості випромінювачів в ній, наявності акустичних екранів, розмірів системи та елементів в ній;
- типу конструкцій випромінювачів, їх конфігурації та розмірів;
- складів застосованої п'єзокераміки, її поляризації та виду п'єзоефекту.

Як приклад розрахунків на рис. 1.1. для трьохелементної антени з частотно незалежним електричним збудженням наведені частотні залежності амплітуд коливальної швидкості п'єзокерамічних перетворювачів у складі пласкої антени. Для порівняння така ж залежність наведена і для одиночного перетворювача при його роботі поза антеною. Порівняння наведених кривих свідчить про те, що врахування при розрахунках всіх фізичних полів електроакустичних приладів і систем всіх видів їх взаємодії при умові їх електричного збудження частотно незалежною електричною напругою обумовлює:

- перетворення коливальних систем в багато резонансних;
- значне зміщення резонансів в область низьких частот (в 5-10 разів нижче основного резонансу одиночного перетворювача);
- значне (в 5-10 разів порівняно з одиничним перетворювачем) збільшення амплітуд коливальних систем перетворювачів;

- залежність резонансів і амплітуд коливальних швидкостей перетворювачів від місця їх розташування в антені.

Природно що такі нові знання повинні суттєво вплинути на конструювання акустичних приладів і систем в частині їх механічної міцності.

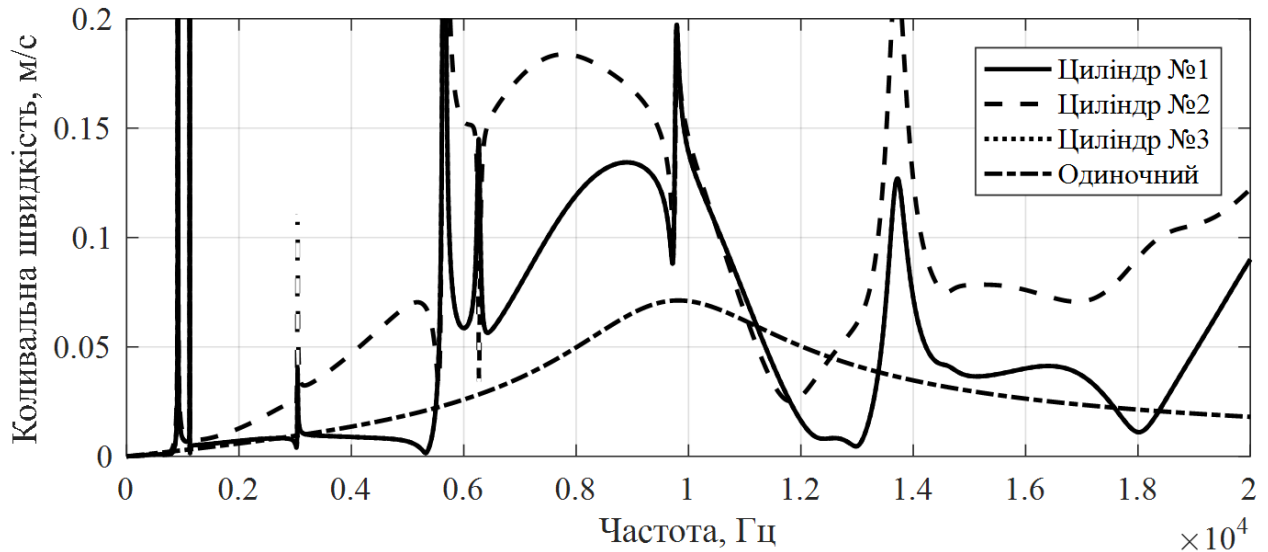


Рис. 1.1. Частотна залежність амплітуди коливальної швидкості середнього випромінювача в трьохелементній системі при першому варіанті електричного збудження системи.

Зовсім інша ситуація має місце при реалізації другого варіанту електричного збудження конструкцій електроакустичних приладів в системах. Фізична модель системи включає в себе конструкції випромінювачів, коливальна швидкість випромінюючих поверхонь яких є сталою в робочому діапазоні частот системи і може бути вибрана на межі динамічної міцності складу п'єзокераміки, з якої виготовлені конструкції електроакустичних приладів. Такий підхід забезпечує по-перше, контроль над таким обмежуючим максимальну потужність випромінювання фізичним фактором як механічна динамічна міцність і, по-друге, забезпечує умови випромінювання максимальної потужності в механічних полях конструкцій електроакустичних приладів в системах.

Продемонструємо процедуру розробки розрахункового забезпечення конструкцій електроакустичних приладів при такому підході на прикладі довільної системи п'єзокерамічних циліндричних випромінювачів будь-якого конструктивного виконання [34 -36]

Розглянемо задачу про випромінювання звуку довільною гідроакустичною системою, утвореною зі скінченної кількості N кругових п'єзокерамічних циліндричних випромінювачів з окружною поляризацією. Поздовжні осі випромінювачів паралельні між собою та довільним чином розташовані у просторі. Кожен випромінювач являє собою кругову циліндричну оболонку із середнім радіусом r_{0s} та товщиною h_s , утворену з $M^{(s)}$ п'єзокерамічних елементів-призм, жорстко склеєних між собою в єдину конструкцію. Внутрішня порожнина випромінювачів може бути вакуумована, заповнена повітрям або рідиною. Кожен випромінювач системи збуджується на нульовій моді коливань електричною напругою $\Psi^{(s)} = \Psi_0^{(s)} e^{-i\omega t}$, де ω – кругова частота збудження випромінювачів. Напруги збудження $\Psi_0^{(s)}$ обрані таким чином, що всі випромінювачі в антені коливаються з однаковою швидкістю $\dot{W}^{(s)}$ і ця швидкість дорівнює гранично допустимій коливальній швидкості $\dot{W}^{(s)} = \dot{W}_{0, \max}$, вище якої настає механічне руйнування випромінювачів. Саме при такому підході, як було показано вище, забезпечується максимальна енергетична ефективність системи, що розглядається. Таким чином, у викладеній постановці задача про випромінювання звуку системою зводиться до визначення електричної напруги збудження її випромінювачів [19-21, 39-41].

Для вирішення задачі введемо ряд припущень та систем координат. Вважатимемо, що випромінювачі є нескінченно довгими. Це твердження справедливе, якщо висота випромінювачів перевищує (3-5) довжин робочих хвиль [39, 53]. Внутрішні порожнини випромінювачів заповнені пружними

середовищами із густиною ρ_s та швидкістю звуку c_s , $s=1,\dots,N$. Система випромінювачів розташовується в ідеальному середовищі, що стискається, з хвильовим опором ρc . Нормальний переріз схеми побудови системи та введені для розв'язання задачі прямокутні та пов'язані з ними кругові циліндричні системи координат зображені на рис. 1.2.

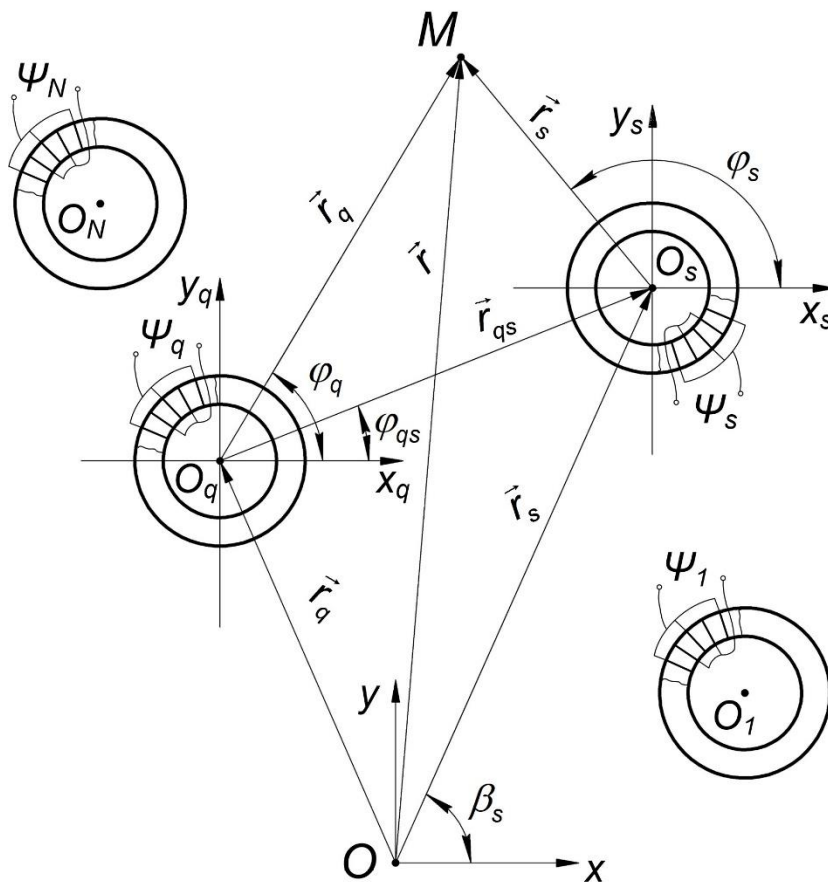


Рис. 1.2. Система випромінювачів та введені прямокутні та циліндричні системи координат

У математичному плані розв'язання задачі зводиться до спільного розв'язання системи диференціальних рівнянь:

- рівняння Гельмгольца, що описує рух пружних середовищ усередині та поза кожним s -м випромінювачем системи:

$$\Delta \Phi^{(s)} + k_s^2 \Phi^{(s)} = 0; \quad s = 1, \dots, N \quad (1.1)$$

- рівняння руху тонкої п'єзокерамічної оболонки з окружною поляризацією s -го випромінювача системи у переміщеннях [40]:

$$\begin{aligned} (1 + \beta^{(s)}) \frac{\partial^2 U^{(s)}}{\partial \varphi_s^2} + \frac{\partial W^{(s)}}{\partial \varphi_s} - \beta^{(s)} \frac{\partial^3 W^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} &= \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 U^{(s)}}{\partial t^2}; \\ -\frac{\partial U^{(s)}}{\partial \varphi_s} + \beta^{(s)} \left(\frac{\partial^3 W^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} - \frac{\partial^4 W^{(s)}}{\partial \varphi_s^4} \right) - W^{(s)} &+ \frac{e_{33}^{(s)} r_{0s}}{C_{33}^{E(s)}} E_\varphi^{(0)s} + \frac{\alpha^{(s)}}{h_s} q_r^{(s)} = \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 W^{(s)}}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

- рівняння вимушеної електростатики для п'єзокераміки s -го випромінювача:

$$\vec{E}^{(s)} = -\text{grad } \Psi^{(s)}; \quad \text{div } \vec{D}^{(s)} = 0. \quad (1.3)$$

Тут Δ - оператор Лапласа; $\Phi^{(s)}$ – потенціал коливальної швидкості s -го випромінювача; k і k_s – хвильові числа зовнішнього та внутрішнього середовищ s -го випромінювача; $U^{(s)}$ і $W^{(s)}$ – окружна та нормальна складові вектора зміщень точок серединної поверхні s -го випромінювача;

$\beta^{(s)} = \frac{h_s^2}{12 r_{0s}^2} \left(1 + \frac{e_{33}^{2(s)}}{C_{33}^{E(s)} \epsilon_{33}^{s(s)}} \right)$; $\alpha^{(s)} = \frac{r_{0s}^2}{C_{33}^{E(s)}}$; $\gamma^{(s)}$ - густина матеріалу s -ї оболонки;

$q_r^{(s)}$ - зовнішнє радіаційне навантаження s -го випромінювача; $C_{33}^{E(s)}$, $\epsilon_{33}^{s(s)}$, $e_{33}^{(s)}$ – модулі пружності при нульовій електричній напруженості, діелектрична проникність при нульовій деформації та п'єзоконстанта s -го випромінювача відповідно; $\vec{E}^{(s)}$ і $\vec{D}^{(s)}$ - вектори напруженості та індукції електричного поля s -го випромінювача.

З урахуванням умови завдання $\dot{W}^{(s)} = \dot{W}_{0,\max}$ для всіх $s = 1, \dots, N$ вираз (2), що описує радіальні коливання п'єзокерамічних оболонок, набуває вигляду:

$$\frac{e_{33}^{(s)}}{C_{33}^{E(s)}} r_{0s} E_{\varphi}^{(0)s} + \frac{\alpha^{(s)}}{h_s} q_r^{(s)} = W_{0,\max} \left(1 - \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \omega^2 \right), \quad (1.4)$$

$$\text{де } \dot{W}^{(s)} = \frac{dW^{(s)}}{dt}, \text{ і } \frac{\partial^2 W^{(s)}}{\partial t^2} = -\omega^2 W^{(s)}.$$

З урахуванням того, що акустичне поле формується кожним випромінювачем системи у двох областях – внутрішній $\Phi_2^{(s)}$ та зовнішній $\Phi_1^{(s)}$ з границями $0 \leq |\varphi_s| \leq \pi$; $0 \leq r_{2s} = r_{0s} - h_s/2$ і $0 \leq |\varphi_s| \leq \pi$; $r_s \geq r_{1s} = r_{0s} + h_s/2$ відповідно, кінематичні та динамічні умови спряження акустичних полів на границях розділу областей набувають вигляду:

$$\begin{cases} \frac{dW^{(s)}}{dt} = -\frac{d\Phi_1}{dr_s}; 0 \leq |\varphi_s| \leq \pi; r_{0s} = r_{1s}; s = 1, \dots, N; \\ \frac{dW^{(s)}}{dt} = -\frac{d\Phi_2^{(s)}}{dr_s}; 0 \leq |\varphi_s| \leq \pi; r_{0s} = r_{2s}; s = 1, \dots, N; \\ \sigma_r^{(s)} = q_r^{(s)} = -\left(p_1 - p_2^{(s)} \right); 0 \leq |\varphi_s| \leq \pi; s = 1, \dots, N, \end{cases} \quad (1.5)$$

де Φ_1 - повне поле випромінювання системи, виражене в координатах s -го випромінювача; Φ_2 - поле випромінювання у внутрішній області s -го випромінювача; $\sigma_r^{(s)}$ - нормальна складова тензора механічних напружень у п'єзокераміці s -го випромінювача; $p_1 = \rho \left(\frac{d\Phi_1}{dt} \right)$ і $p_2^{(s)} = \rho_s \left(\frac{d\Phi_2^{(s)}}{dt} \right)$ - радіаційні навантаження від динамічного тиску.

Електричні граничні умови (3) при динамічному деформуванні циліндричних випромінювачів електричною напругою $\Psi^{(s)}$ набувають вигляду [37]:

- напруженість електричного поля у матеріалі п'єзокерамічної оболонки s -го випромінювача при окружній поляризації:

$$E_{\phi}^{(0)s} = -\frac{M^{(s)}\Psi_0^{(s)}}{2\pi r_{0s}}, \quad (1.6)$$

де $M^{(s)}$ - число призм, з яких склеюється п'єзокерамічна оболонка s -го випромінювача;

- складові електричної індукції вздовж радіусу, поздовжньої осі та окружності відповідно:

$$D_{\phi}^{(s)} = \epsilon_{33}^{s(s)} E_{\phi}^{(s)} + e_{33}^{(s)} \left(\frac{dU^{(s)}}{d\phi_s \cdot r_{0s}} + \frac{W^{(s)}}{r_{0s}} \right); \quad (1.7)$$

$$D_r^{(s)} = 0; D_z^{(s)} = 0; s = 1, \dots, N.$$

Перераховані механічні та електричні умови доповнюються умовами випромінювання на нескінченності та відсутністю особливостей у внутрішніх областях кожного з випромінювачів системи.

Розв'язання задачі шукатимемо методом зв'язаних полів у багатозв'язних областях. Для цього представимо акустичні поля наступними розкладаннями:

$$\begin{cases} \Phi_1 = \sum_{s=1}^N \Phi_1^{(s)}; s = 1, \dots, N; \\ \Phi_1^{(s)}(r_s, \phi_s) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^{(s)} H_n^{(1)}(kr_s) e^{in\phi_s}; \\ \Phi_2^{(s)}(r_s, \phi_s) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n^{(s)} J_n(k_s r_s) e^{in\phi_s}. \end{cases} \quad (1.8)$$

У співвідношеннях (8) використані традиційні позначення циліндричних функцій. Невідомі коефіцієнти, що входять у співвідношення $A_n^{(s)}$ і $B_n^{(s)}$, визначаються із граничних умов (5) – (7). Необхідне для цього перенесення систем координат здійснюється на підставі теорем додавання для циліндричних хвильових функцій [35]:

$$H_m^{(1)}(kr_q)e^{im\varphi_q} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(kr_s)H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs})e^{i(m-n)\varphi_{qs}}e^{in\varphi_s}, \quad (1.9)$$

де r_{qs} , і φ_{qs} - полярні координати початку координатної системи O_s у координатах q -ї системи.

Алгебраїзація функціональних рівнянь (1), (3) – (7) з урахуванням (8) та (9), властивостей повноти та ортогональності систем кутових функцій на інтервалі $[0, 2\pi]$ дозволяє отримати для визначення невідомих коефіцієнтів $A_n^{(s)}$ і $\Psi_0^{(s)}$ розкладання (7) нескінченну систему лінійних алгебраїчних рівнянь виду

$$\left\{ \begin{aligned} & A_n^{(s)} H_n^{(1)'}(kr_{1s}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq s}}^N \sum_m A_m^{(q)} J_n'(kr_{1s}) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs}) e^{i(m-n)\varphi_{qs}} = -\frac{\dot{W}_{0,\max}}{k}; \quad n = -\infty, 0, \infty; \\ & \left[\frac{e_{33}^{(s)}}{C_{33}^{E(s)}} \frac{M^{(s)} \Psi_0^{(s)}}{2\pi} + \frac{\alpha^{(s)} i \omega}{h_s} \rho \left[A_n^{(s)} H_n^{(1)}(kr_{1s}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq s}}^N \sum_m A_m^{(q)} J_n(kr_{1s}) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs}) e^{i(m-n)\varphi_{qs}} \right] \right] = \\ & = W_{0,\max} \left(1 - \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \omega^2 - \frac{\alpha^{(s)} \rho_s}{h_s} \omega^2 \right); \quad n = -\infty, 0, \infty; \quad s = 1, \dots, N, \end{aligned} \right. \quad (1.10)$$

де штрих означає похідну функції за аргументом.

Невідомі коефіцієнти $B_n^{(s)}$ визначаються з другої граничної умови системи (5) і дорівнюють

$$B_n^{(s)} = -\frac{\dot{W}_{0,\max}}{J_n'(k_s r_{2s})}. \quad (1.11)$$

Нескінченна система рівнянь (10) заміною невідомих $A_n^{(s)}$ новими невідомими $\tilde{A}_n^{(s)}$ за формулою $\tilde{A}_n^{(s)} = A_n^{(s)} \cdot H_n^{(1)'}(kr_{1s})$ може бути зведена до виду, що розв'язується методом редукції або методом послідовних наближень.

Усі члени системи (10) мають певний фізичний зміст. Вільні члени описують частотно залежні механічні коливання випромінювачів системи. Подвійні суми характеризують взаємодію між випромінювачами в системі по акустичному полю, обумовлену багаторазовим випромінюванням і розсіюванням хвиль на них. В них входить множник $H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs})$, який залежить від відстані між випромінювачами. Він описує обмін хвилями m -го та n -го порядків розсіювання між випромінювачами з номерами q і s , де $q=1, \dots, N$ і $s=1, \dots, N$ і $q=s$. При збільшенні хвильової відстані kr_{qs} цей множник зменшується і роль взаємодії знижується. Члени системи, що містять множник $\Psi_0^{(s)}$, характеризують здатність перетворення електричної енергії в електромеханічну в п'єзокерамічному перетворювачі. Пари функцій, що входять до матричних елементів $J_n'(kr_{1s})$, $H_n^{(1)'}(kr_{1s})$ і $J_n(kr_{1s})$, $H_n^{(1)}(kr_{1s})$ описують розсіювання звуку одиночними циліндричними тілами відповідно акустично жорсткого і акустично м'якого типів при дифракції звукових хвиль на них.

З фізичних міркувань та наведених виразів зрозуміло, що розглянуте випромінювання звуку системою тіл є складним фізичним процесом, що включає взаємодію трьох фізичних полів – електричного, механічного і акустичного, в процесі перетворення електричної енергії в акустичну в випромінювачах системи і двох видів взаємодії в процесі випромінювання звуку. Перший з двох видів є взаємодія механічного поля кожного випромінювача з акустичними полями, створюваними випромінювачем у внутрішньому і зовнішньому середовищах і відбиває реакцію цих середовищ на збудження звуку них. Другий вид взаємодії

характерний тільки для акустичного поля та обумовлений багаторазовим обміном розсіяними та випромінюваними хвилями між тілами системи.

У зв'язку з викладеним особливий інтерес представляє детальне вивчення властивостей кожного з полів, оскільки кожна з цих властивостей визначальним чином може впливати на вибір та побудову як самої системи випромінювачів, так і пов'язаних з нею пристроїв при функціонуванні їх у єдиній системі.

Знання параметрів електричного поля дозволяє здійснити узгодження випромінювачів у складі системи з збуджуючими генераторними пристроями, забезпечити максимальну подачу електричної енергії без небезпеки порушення електричної міцності електроакустичного пристрою в цілому і тим самим підвищити його енергетичну ефективність.

Знання параметрів механічного поля дозволяє забезпечити максимальну енергетичну ефективність електроакустичного пристрою в цілому за рахунок правильного узгодження системи випромінювачів з навколишнім середовищем, зниження рівня пікових значень звукового тиску в ближній зоні системи, для виключення виникнення кавітаційних явищ у ній та створення прийнятних умов для раціонального узгодження електричних опорів випромінювачів системи з вихідними опорами генераторів, що їх збуджують.

Результати розрахунків збуджуючої електричної напруги для одиночного циліндричного випромінювача, утвореного із п'єзокераміки з радіальною поляризацією, наведені в роботі [19].

Як приклад розрахунків для трьохелементарної плоскої антени на рис. 1.3. наведені частотні залежності амплітуд і фаз електричного збудження п'єзокерамічних перетворювачів з однаковою коливальною швидкістю всіх перетворювачів у складі антени.

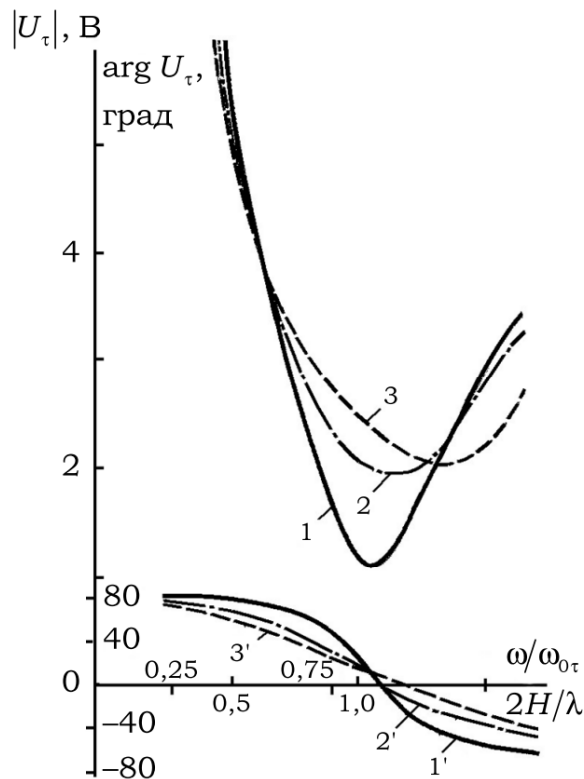


Рис. 1.3. Частотні залежності амплітуд (криві 1 - 3) і фаз (криві 1' - 3') при другому варіанті електричного збудження системи [19].

Як бачимо, врахування при розрахунках всіх фізичних полів всіх видів взаємодії при умові однаковості амплітуд коливальної швидкості всіх перетворювачів у складі антени обумовлює:

- необхідність їх електричного збудження частотно залежними амплітудами і фазами;
- залежність характеристик збудження від місця розташування перетворювачів в антені.

Природно що такі нові знання повинно суттєво вплинути на конструювання акустичних приладів і систем в частині їх електричної міцності.

Результати досліджень по наведеній математичній процедурі дозволяють створити розрахункове забезпечення розробки конструкцій електроакустичних

приладів з другим варіантом їх електричного збудження в системах в залежності від тих же варіантів конструктивного виконання систем і приладів, що і при першому варіанті їх електричного збудження.

І, нарешті, на теперішній час відсутні будь-які результати досліджень по третьому варіанту електричного збудження конструкцій електроакустичних приладів в системах. У фізичних моделях конструкцій таких систем здійснюється контроль над двома основними обмежуючими потужність фізичними факторами – механічною міцністю і електричною міцністю. Це пояснює і відсутність необхідного розрахункового забезпечення конструювання приладів при такому варіанті електричного збудження.

Виходячи із наведеного аналізу, всі подальші дослідження конструювання електроакустичних приладів будуть базуватись на системах з першим варіантом електричного збудження електроакустичних приладів в системах, найбільш поширеним при технічній реалізації сучасних електроакустичних систем різного призначення.

1.5. Аналіз існуючого стану розрахункового забезпечення конструювання підводних електричних приладів і основних напрямків його розвитку.

Розрахункове забезпечення конструювання підводних електроакустичних приладів і систем завжди було «ахіллесовою п'ятою» технічної гідроакустики. Пов'язане це було як зі складністю конструкторських задач, які доводилось розв'язувати при створенні нових електроакустичних пристроїв для роботи в рідині, так із причини відсутності знань щодо властивостей матеріалів, які застосовувались в конструкціях, і їх поведінці в жорстких умовах експлуатації, впливу технології виготовлення пристроїв на характеристики їх конструкцій,

впливу прийняття тих чи інших конструкторських рішень на електроакустичні характеристики пристроїв тощо.

Перше розрахункове забезпечення конструювання підводних електроакустичних приладів було створено в 70-ті роки минулого століття і відносилось воно до конструювання підводних електроакустичних перетворювачів. Запропонований функціональний вузловий метод дозволив виконати дослідження характеристик ряду конструкційних матеріалів, створити нові технології виготовлення перетворювачів і врахувати їх вплив на характеристики перетворювачів, визначити вплив акустичних навантажень приладів на характер і поведінку конструкцій в часі і багато іншого. Створене в той час розрахункове забезпечення конструювання електроакустичних приладів базувалось на тих знаннях і підходах, які існували в той час.

Але протягом кількох останніх десятиліть були створені нові знання, які суттєво, а в деяких напрямках і принципово змінили наші уявлення про функціонування електроакустичних приладів і систем, побудованих з використанням п'єзокераміки.

Перш за все це відноситься до особливостей, які пов'язані з виконанням електроакустичними приладами функції перетворення енергії. Вченими Грінченком В.Т., Улітком А.Ф., Шульгою М.О. [19-21, 39-40, 54-55] для конструкцій з використанням п'єзокерамічних середовищ були встановлені і досліджені закономірності взаємного зв'язку між електричними і механічними полями в них при перетворенні енергії.

Пізніше вченими Грінченком В.Т., Вовком І.В., Маципуною В.Т., Коржиком О.В., Лейком О.Г., Дерепую А.В. [19-21, 25-28, 41-45, 56-59] до списку зв'язаних полів було додано акустичне поле і досліджені закономірності перетворення енергії з урахуванням зв'язності в електроакустичних пристроях різного призначення електричних, механічних і акустичних полів.

Особливості, пов'язані із використанням другої функції електроакустичних приладів і систем, а саме, формування акустичних полів в оточуючих середовищах, були досліджені в роботах Грінченка В.Т., Вовка І.В., Маципури В.Т. [19-21, 30-33, 39-40, 55-62] по одиночним електроакустичним пристроям, і в роботах Гузя О.М., Кубенка В.Д., Коржика О.В., Лейка О.Г., Дерепи А.В. [19-21, 30-33, 39-40, 55, 60-69] по електроакустичним системам різного виду. Встановлено, що фізичною причиною появи взаємодії акустичних полів всіх елементів електроакустичних пристроїв різного призначення є багатократність випромінювання і перевідбиття звукових хвиль в цих пристроях. Визначені і досліджені для електроакустичних приладів і систем різного призначення закономірності акустичної взаємодії полів.

І, нарешті, в роботах Грінченка В.Т., Вовка І.В., Маципури В.Т., Коржика О.В., Лейка О.Г., Дерепи А.В. [19-21, 30-33, 41-44, 70-77] та інших досліджені фізичні особливості і закономірності всіх фізичних полів для підводних електроакустичних приладів і систем різного призначення з урахуванням всіх наведених вище взаємних зв'язків цих полів і процесів перетворення і формування енергії. Узагальнені результати цих досліджень викладені в попередніх підрозділах і свідчать про необхідність і актуальність робіт щодо створення нового розрахункового забезпечення конструювання перспективних електроакустичних приладів і систем різного призначення на сучасному етапі розвитку технічної електроакустики.

Висновки до розділу 1

Визначені фізичні фактори, що обмежують потужність акустичного випромінювання, а відтак, і міцність конструкцій електроакустичних приладів і систем. Ці фактори пов'язані з чотирма фізичними полями, які виникають в

конструкціях електроакустичних приладів при випромінюванні звуку – електричним, механічним, акустичним і тепловим. До цих факторів відносяться: механічні напруження, обумовлені кавітацією; механічні циклічні динамічні напруження, пов'язані з коливальною швидкістю; напруженість електричного поля, збуджуючого електроакустичні прилади; температура конструкцій та температурні напруження.

При визначенні технічних шляхів організації керованого впливу цих факторів на випромінювання максимальної потужності виділені дві обставини. Перша пов'язана з поділом обмежуючих факторів на первинні (збуджуюча напруга, та коливальна швидкість) і вторинні. Друга обставина пов'язана з роботою випромінюючого приладу самостійно чи в системі. Проведено детальний аналіз впливу другої обставини.

Встановлена необхідність при розробці конструкцій електроакустичних приладів спільного розгляду впливу первинних обмежувальних факторів. Показано, що при цьому можливі три підходи. При першому підході всі випромінювачі системи збуджуються незалежною від частоти електричною напругою, при другому – вони мають однакову коливальну швидкість, при третьому – компромісному, поєднуються вимоги обох попередніх підходів. Визначені і негативні якості всіх трьох підходів.

Розв'язана задача випромінювання звуку довільною системою п'єзокерамічних циліндричних випромінювачів при другому підході, коли вони мають однакові коливальні швидкості. Одержані аналітичні вирази для розрахунків електричних, механічних та акустичних полів, що дозволяє одержувати кількісні значення цих полів для забезпечення розробки конструкцій приладів.

Показано, що в теперішній час найбільше поширення знайшов перший підхід у зв'язку з простотою схем виконання електричного збудження

випромінювачів. Тому розрахункове забезпечення конструювання електроакустичних приладів повинно створюватися для нього.

Викладено аналіз існуючого стану розрахункового забезпечення конструювання електроакустичних приладів і систем, історію проведення досліджень, необхідність і актуальність створення нового розрахункового забезпечення на їх основі.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНІ ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ НАВАНТАЖЕННЯ ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЇХ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИ КОНСТРУЮВАННІ ПІДВОДНИХ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ ПРИЛАДІВ

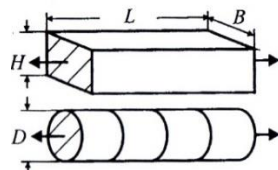
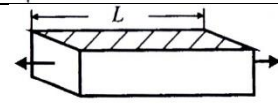
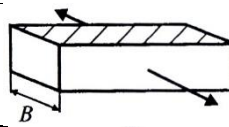
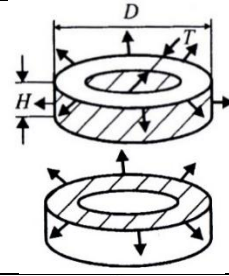
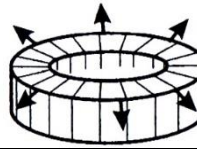
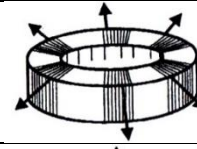
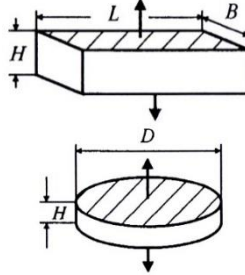
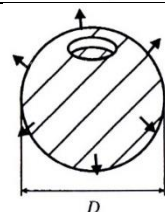
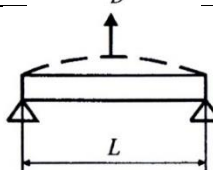
Розглянемо вимоги, що повинні обов'язково бути враховані при розробці конструкцій електроакустичних приладів та систем. Поділимо ці вимоги на загальні, технічні, експлуатаційні, технологічні та інші, дамо їм визначення та оцінимо якісно можливі наслідки їх врахування при конструюванні.

Ці вимоги повинні бути одночасно і реальними, тобто відповідати досягнутому рівню науки і техніки, і націленими на майбутнє, тобто враховувати перспективу розвитку, модернізаційну властивість та функціональне нарощування електроакустичної апаратури. В процесі конструювання необхідно враховувати, що конструкція повинна відповідати множині суперечних вимог.

2.1. Існуючі підходи до конструювання електроакустичних приладів різних типів.

Електроакустичні прилади — найбільш специфічний елемент електроакустичної апаратури, який здійснює взаємозв'язане перетворення різних видів енергії. При конструюванні приладів основна вимога полягає в тому, щоб забезпечити при цьому необхідну форму коливань їх вибраного активного елемента. Механічні коливальні системи, які на практиці використовуються для побудови перетворювачів, ілюструє таблиця 2.1 [3]. Вона демонструє різноманіття створених на п'єзокерамічних елементах коливальних систем. Для забезпечення їх ефективної роботи в режимах випромінювання та прийому звукових хвиль, реалізація заданої форми коливань здійснюється як за рахунок відповідного кріплення активного елемента до корпусу приладу, так і за рахунок необхідного електричного ввімкнення відповідних частин активного елемента.

Таблиця 2.1.

Тип коливальної системи	Основна (нижня) форма коливань	Схема конструкції активного елемента
Стержень пів хвильовий $L > 3B, 3H$ $L > 3D$	Поздовжні коливання, поздовжня поляризація	
	Поздовжні коливання, поперечна поляризація	
	Коливання по ширині, поперечна поляризація	
Тонкий циліндр $D \gg T$	Пульсуючі коливання	
Тонкий секціонований циліндр	Те ж саме	
Тонкий секціонований циліндр з податливими пасивними вставками	Те ж саме	
Тонка пластина $H \ll L, B, D$	Товщинні коливання	
Порожниста сфера	Пульсуючі коливання	
Біморфна пластина	Згинні коливання	

На рис. 2.1 [3] зображені основні форми коливань п'єзокерамічних приладів та електричне включення п'єзоелементів, яке забезпечує їх реалізацію: *а, б* – пульсуючий та осцилюючий циліндри; *в* – півхвильовий стержень; *г* – кругла згинна пластина.

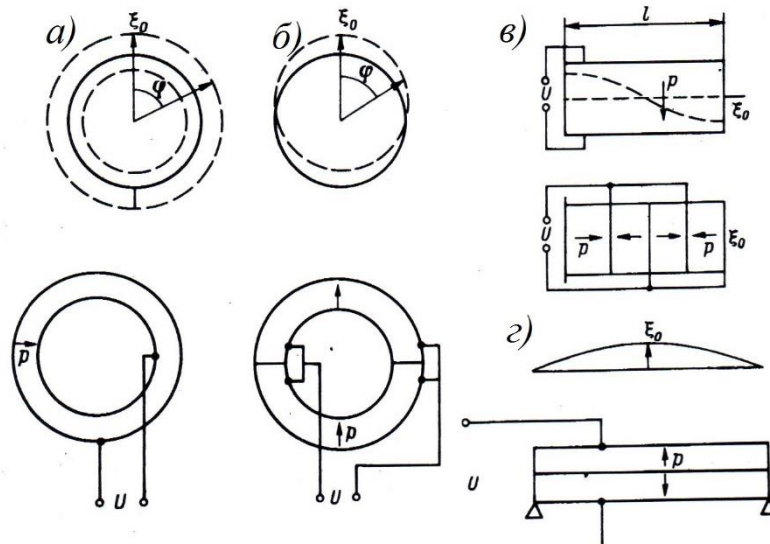


Рис. 2.1. Основні форми коливань п'єзокерамічних приладів

У зв'язку з тим, що робочими середовищами конструкцій електроакустичних перетворювачів, що розглядаються, є як повітря так і рідина, для забезпечення їх надійної і довготривалої роботи необхідно здійснити електроізоляцію і герметизацію тих частин активних елементів приладів, які знаходяться під електричною напругою.

Потрібну механічну міцність п'єзокерамічних активних елементів приладів при роботі їх в режимах випромінювання звуку забезпечують армуванням з допомогою спеціальних зміцнюючих деталей із металевих або полімерних матеріалів. Для захисту конструкцій від електрохімічної корозії використовують корозійно-стійкі матеріали або приймають специфічні заходи (покриття, протектори та інші). Елементи електроізоляції, герметизації і армування повинні утворювати єдину коливальну систему з активним елементом. Тому необхідним

завданням при конструюванні є їх відповідне механічне спряження. Для запобігання непотрібного випромінювання (прийому) звуку тильними або протифазними ділянками поверхонь перетворювачів їх екранують звуком'якими або звукожорсткими акустичними відбиваючими або поглинаючими звук матеріалами.

Таким чином, задача конструювання приладів полягає в тому, щоб вибрати такі основні конструктивні елементи та їх спряження, які забезпечать необхідну ефективність, надійність та довговічність кожного приладу при його мінімальних розмірах, масі та вартості.

Сучасні конструкції електроакустичних приладів, призначені для довготривалої експлуатації в різних середовищах, особливо рідинних, повинні витримувати дію значних зовнішніх тисків та електричних і механічних напружень, що виникають при випромінюванні великих питомих потужностей. Тому ці конструкції відносяться до достатньо складних і для їх розробки був запропонований і знайшов широке застосування специфічний метод конструювання – функціонально-вузловий метод [1, 3, 4]. Згідно з цим методом конструкцію будь-якого електроакустичного приладу – антени або перетворювача, поділяють на ряд вузлів різного функціонального призначення, що забезпечують її довготривалу роботу:

- вузол (активний елемент), що перетворює електричну енергію в механічну;
- вузол забезпечення механічної міцності;
- вузол герметизації і електроізоляції, що забезпечує необхідні електричний опір і електричну міцність конструкції електроакустичного приладу;
- вузол кріплення активного елемента;
- вузол екранування, що забезпечує випромінювання (прийом) звуку лише визначеними поверхнями приладу.

При правильному виборі параметрів всіх вузлів конструкцій приладів їх реальний термін служби може становити 10 – 15 років з вірогідністю безвідмовної роботи не менше 0,95. При цьому правильний вибір матеріалів конструкцій включає врахування:

- законів розподілу значень параметрів використаних матеріалів;
- процесів зміни параметрів активних і екрануючих матеріалів під впливом тиску, температури і старіння;
- процесів зволоження і старіння герметизуючих і електроізолюючих матеріалів;
- процесів накопичення електричних і механічних ушкоджень.

Зображення одної із найбільш поширених конструкцій сучасних електроакустичних приладів і утворюючих її функціональних вузлів наведено на рис. 2.2., де *a* – конструкція циліндричного перетворювача силового типу; *b* – вузол перетворення енергії; *v* – вузол електроізоляції; *z* – вузол герметизації; *d* – вузол механічної міцності; *e* – вузол екранування; 1 – активний елемент; 2 – кріплення; 3 – корпус; 4 – електроізоляція; 5 – елемент армування (бандаж); 6 – струмоввід; 7 – акустичний екран.

Активний елемент 1 цього приладу складається із сукупності п'єзокерамічних елементів, які мають вигляд призми і з'єднуються між собою за допомогою клею. Кріплення активного елемента до корпусу приладу здійснюється з допомогою еластичних прошарків 2 із полімерних або металевих матеріалів.

Електроізоляція активного елемента приладу забезпечується шарами твердих, рідких та газоподібних електроізоляційних матеріалів 4, які розміщуються між активним елементом і корпусом приладу або середовищем його експлуатації [1, 3, 4].

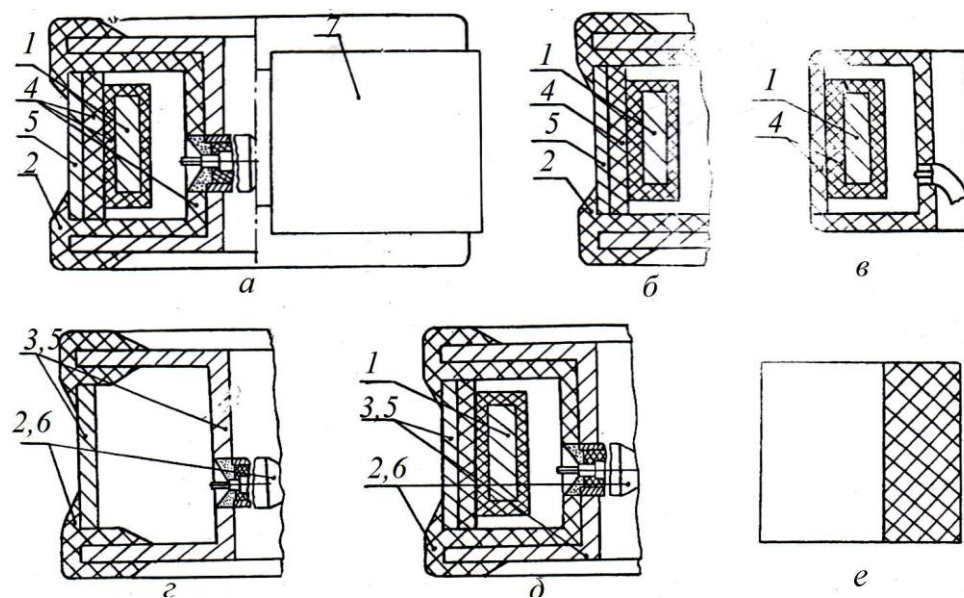


Рис. 2.2. Функціональні вузли електроакустичних приладів

Герметизація активного елемента здійснюється за допомогою сполучення звулканизованих або склеєних між собою шарів герметизуючи матеріалів (деталі 2, 3, 4, 5).

Механічна міцність всіх елементів забезпечується за рахунок відповідного вибору параметрів конструкційних матеріалів та розмірів деталей. При необхідності механічна міцність активного елемента може бути збільшена шляхом накладання на нього спеціальних стискуючих напружень, які створюються елементами армування 5.

В якості відбиваючих звук акустичних екранів використовується шари матеріалів з високими значеннями коефіцієнта відбиття звуку.

Оскільки різним формам коливань активних елементів відповідають різні конфігурації тіл, що коливаються, які мають суттєво різні розміри та механічні і електричні напруження при реалізації одних і тих же значень резонансних частот і зміщень, далі розглянемо типові конструкторські рішення, які запропоновані для практичної реалізації в конструкціях окремих вузлів основних видів конструкцій сучасних електроакустичних приладів.

В процесі експлуатації електроакустична апаратура в залежності від типу середовища, в якому використовуються акустичні технології, повинна витримувати дію ряду експлуатаційних навантажень і факторів, обумовлених цим середовищем. В подальшому терміном “експлуатація” будемо називати безперервний процес, який включає ряд заходів по підготовці виробу до застосування, підтримці його в робочому стані, використанню із заданою ефективністю з моменту виготовлення до списання [3, 35, 78]. До умов експлуатації звичайно відносять: кліматичні умови; механічні дії, ударно-вібраційні навантаження, статичний тиск, зокрема гідростатичний; дії іонізуючих випромінювань; навантаження, яких створюється режимом випромінювання.

Розглянемо послідовно ці умови та відповідаючі їм конструкційно-технологічні вимоги в загальному вигляді до електроакустичної апаратури різного призначення.

Всі конструкції електроакустичної апаратури повинні відповідати наступним вимогам [3, 79]:

- експлуатаційним, які включають в себе надійність, якість виконання елементами своїх функцій, ремонтпридатність, стійкість до старіння, габарити і масу;
- конструктивно-технологічним, до яких відносяться захист від зовнішніх дій, стабільність параметрів, конструктивна спадковість та технологічність;
- економічним, згідно яким всі види фактичних затрат на створення і експлуатацію електроакустичної апаратури повинні відповідати апріорно визначеному на затвердженій методиці значенню критерію вартість – ефективність.

Ці вимоги взаємно пов’язані і знаходять своє вираження в характеристиках та властивостях апаратури.

Конструювання будь-якої електроакустичної апаратури здійснюється на основі технічного завдання, яке включає в себе технічні характеристики, що

залежать від призначення апаратури, умов експлуатації та особливостей сучасних можливостей її виготовлення. Задачі, які вирішує апаратура, дуже складні та різноманітні, тому оцінити їх одним показником якості практично неможливо. Звичайно, використовується декілька показників: надійність, маса, габарити, потужність, складність і вартість виробництва та експлуатації, здатність зберігати свої характеристики при зміні навколишніх умов (температури, вологості, тиску), при вібраційних, ударних і лінійних механічних перенавантаженнях.

При розробці конструкції електроакустичної апаратури повинна бути забезпечена експлуатаційна надійність, зручність, та простота управління та обслуговування, компактність та мала маса [3, 4, 79, 80].

Експлуатаційна надійність – це властивість системи зберігати свої технічні параметри у встановлених межах до початку і протягом потрібного часу в заданих умовах експлуатації при дотриманні встановлених заходів використання технічного обслуговування, ремонтів, зберігання та транспортування.

В залежності від призначення приладів і систем та умов їх роботи експлуатаційна надійність може включати безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збереження окремо або визначене сполучення цих властивостей як для систем, так і для їх частин.

Експлуатаційна довговічність – властивість апаратури зберігати працездатність до настання граничного стану з необхідними перервами для технічного обслуговування та ремонту.

В процесі експлуатації спостерігається зміна основних технічних характеристик електроакустичних приладів і систем. Фактори та навантаження, які визначають величину і ступінь таких змін поділяють на технічні, що залежать від властивостей (схематичні та конструкторські рішення) приладів і систем та особливостей їх виготовлення (технологічні особливості; ступінь тренування

вузлів та елементів), та зовнішні експлуатаційні. Ознаки граничного стану встановлюються нормативно-технічною документацією.

Для досягнення високої експлуатаційної надійності електроакустичних приладів та систем в період розробки і виготовлення конструкцій необхідно стежити за такими технічними і технологічними факторами як вибір схемних і конструктивних рішень, що забезпечують при відносно великих відхиленнях параметрів елементів нормальне функціонування приладів і систем; зниження потужності, що розсіюється елементами; зниження температури в апаратурі; використання відносно низьких температур і скорочення часу пайки; оптимізація об'ємів поточного і вихідного контролю; оптимальні умови збереження і транспортування.

Перераховані вище показники є основними і повинні наводитись в технічному завданні на проектування і конструювання електроакустичних приладів і систем, а також в конструкторсько-технічній документації на них.

Як правило, електроакустична апаратура розміщується в кількох конструктивно закінчених виробах. Ці вироби мають несучий корпус, в якому знаходяться складові компоненти апаратури. Автономний в експлуатації виріб, який складається із кількох менш складних виробів і має закритий корпус, називається приладом. Прилад виконує визначені функції. Неавтономна в експлуатації частина приладу, що виготовляється незалежно від інших його частин і, як правило, не має закритого корпусу називається блоком. Іноді конструюють ще менший конструктивний підрозділ – субблок, що виконує якусь одну функцію і змонтований на одній печатній платі або шасі.

Конструкційні вимоги пред'являється як до апаратури в цілому так і до окремих її приладів, блоків і субблоків. При цьому вказуються допустимі габарити і маса; допустимі динамічні (ударні і вібраційні) навантаження; необхідність амортизації, герметизації; вид конструкції (стаціонарна, напільна, настінна, відкрита, закрита, переносна і т.п.); матеріали і захисні покриття; тип

прийнятого монтажу (панельний, блочний навісний печатний і т.п.); зовнішнє оформлення; перелік елементної бази, що допускається.

Технологічні вимоги визначають можливість виготовлення конструкцій електроакустичних приладів і систем із заданими технічними параметрами при мінімальних затратах. Таким чином технологічні вимоги надзвичайно тісно пов'язані з економічними інструктивними вимогами.

Розглянемо в загальному вигляді ті технічні і експлуатаційні фактори і навантаження, в умовах яких функціонують сучасні електроакустичні прилади і системи для мультимедійних акустичних технологій, і сформулюємо вимоги до конструкцій цих приладів і систем та технологій їх виготовлення, які повинні забезпечити виконання цих вимог.

2.2. Експлуатаційні навантаження і вимоги до конструкторсько-технологічного забезпечення їх реалізації.

Всі експлуатаційні навантаження можливо поділити на:

1. Кліматичні (температура, тиск, вологість)
2. Механічні (вібрації, удари)
3. Навантаження, обумовлені особливостями роботи у водному середовищі (гідростатичний тиск, підвищена вологість, агресивне середовище)
4. Обумовлені випромінюванням звуку (кавітаційні, механічні динамічні, електричні, теплові)

Кліматичні навантаження

Нормальні кліматичні умови характеризуються наступними параметрами [3, 4]:

температура $+20 \pm 5$ °C ;

відносна вологість повітря 65 ± 15 % ;

атмосферний тиск 96 – 104 кПа (720 – 780 мм рт. ст.);

відсутність забрудненого повітря.

В залежності від умов експлуатації *температура повітря* в місці розміщення електроакустичної апаратури може змінюватись в широких межах. Низька температура призводить до передчасного руйнування гуми і компаундів; погіршуються умови роботи частин виробів, що труться, залиті мастилами (бо воно загусає); знижується якість пайки радіодеталей, оскільки біле олово, що входить до складу припою, при температурі нижче -13 °C перетворюється в сіре, що швидко руйнується. При збільшенні температури зростає інтенсивність відмов комплектуючих елементів (конденсаторів, резисторів і т.п.), знижується зносостійкість ізоляції. Різкі зміни температури приводять до “запотівання” (збільшення вологості апаратури), що може тягнути за собою зниження ізоляційних властивостей та електричні пробої.

Механічні напруження, які створюються флуктуаціями температури зовнішнього середовища, подібні напруженням, що створюються розігрівом електроакустичного приладу або його елементів при роботі приладу в активному режимі. Шляхи вирішення проблем, які виникають завдяки появі перерахованих механічних напружень при розробці конструкцій електроакустичних приладів та їх елементів, будуть розглянуті далі.

Підвищена **вологість** сприяє окисленню і забрудненню монтажних з'єднань, корозії контактів і струмознімачів, руйнуванню струмопровідних шарів змінних резисторів, покриттів та обмоток виробів. При відносній вологості 80 – 100 % термін служби деталей, виготовлених з чорних металів або тих, що мають у своєму складі металеві елементи, знижується у 2 – 3 рази, а деталей з

алюмінієвих сплавів – у 2 рази. Висока вологість погіршує тепловий режим роботи апаратури. При збільшенні вологості виникають пробої конденсаторів, виникають замикання в дроселях і трансформаторах, мають місце відхилення від номінальних значень параметрів резисторів та конденсаторів. Знижена вологість повітря ($< 30 \%$) знижує міцність емалевих та лакофарбових покриттів, збільшує можливості всихання ізоляційних матеріалів і погіршення їх механічних властивостей. Для захисту апаратури від вологості її покривають водонепроникними, водостійкими лаками, фарбами, компаундами і герметизують вузли і блоки. Забруднення та окислення знімають промивкою та протиркою деталей.

Забруднення повітря домішками палива та мастил діє на матеріали: в комплексі з вологою та підвищеною температурою сприяє забрудненню та окисленню монтажу, прискорює зношення покриттів деталей, викликає корозію і зменшує строки експлуатації апаратури.

Механічні навантаження

Електроакустична апаратура в залежності від призначення і місця встановлення зазнає різні механічні дії. Частота *вібрації* може досягати 10 – 30 Гц, максимальна амплітуда дії – 1 мм; прискорення при ударах 15 – 200 м/с².

Ударно-вібраційні навантаження приводять до передчасного зносу елементів апаратури, виникненню в них явищ втомлення і до часткового чи повного руйнування. Наприклад, при дії ударно-вібраційних навантажень на акустичні антени можуть з'явитися обриви в проводах і кабелях або повне руйнування п'єзoeлементів, коротке замикання в монтажі, потрапляння вологи в середину корпусу, пробій ізоляції, корозія корпусу, втрата поляризації, розмагнічування тощо [3, 4, 81].

Для захисту електроакустичних антен і перетворювачів від можливого псування та дії потоків середовищ використовують стаціонарні або з'ємні

обтічники. При конструюванні обтічника у випадку його роботи в рідинному середовищі до нього пред'являють жорсткі та суперечливі вимоги по механічній міцності та звукопрозорості. Оболонки обтічників виготовляють із корозійно-стійких матеріалів, наприклад, нержавіючої сталі, титану, сплавів АМг, пластмас.

Для захисту апаратури від вібраційно-ударних навантажень використовують різні типи амортизаторів. Вони повинні мати достатню податливість і значну властивість внутрішнього демпфування. В якості пружних елементів в амортизаторах слугує гума та пружинна сталь.

Високий статичний тиск, особливо при роботі електроакустичної апаратури в рідині, може стати причиною механічного руйнування елементів конструкцій і проникнення рідин у їх внутрішню порожнину. З метою захисту апаратури або її елементів від дії зовнішнього тиску використовується пристрої компенсації тиску.

Навантаження, обумовлені особливостями роботи у водному середовищі (гідростатичний тиск, підвищена вологість, агресивне середовище)

Акустична частина електроакустичної апаратури – а це акустичні антени і перетворювачі (мікрофони, гучномовці, гідрофони, гідроакустичні перетворювачі, ультразвукові датчики і т.п.) може працювати в газовому і рідинному середовищах. Природно, що рідинне середовище висуває до електроакустичних приладів та їх вузлів більш жорсткі вимоги в частині умов експлуатації їх конструкцій, оскільки обумовлює дію на конструкції ряду додаткових навантажень і факторів, найважливішими з яких є:

- механічні напруження, що створюються гідростатичним тиском, імпульсними діями та флуктуаціями температури зовнішнього середовища;

- кавітаційні явища, що викликають механічні перевантаження випромінювачів;
- хімічна взаємодія морської води з матеріалами конструкцій антен і перетворювачів;
- дифузне проникнення молекул води крізь полімерні матеріали.

Статичні механічні навантаження, обумовлені дією гідростатичного тиску.

Механічні навантаження в активних елементах електроакустичних приладів складаються із статичних та динамічних напружень. Статичні напруження виникають в основному під дією гідростатичного тиску на елементи конструкцій. Статичну міцність активних елементів характеризує їх властивість створювати опір розриву конструкцій під дією сталих розтягуючих зусиль. Кількісною мірою статичної міцності слугує межа міцності – максимальне напруження розтягування $\sigma_{розт}$, яке витримує даний конструкційний матеріал.

Величина механічних напружень σ_z , що створюються в елементах конструкцій акустичних приладів гідростатичним тиском P_z , визначається співвідношенням

$$\sigma_z = A_i p_z, \quad (2.1)$$

де A_i – коефіцієнт, який визначається способом закріплення та видом напруженого стану конструкції [1, 3]. Природно, що при розробці конструкцій необхідно вести пошук таких рішень, які б мінімізували величину цього коефіцієнту. Але на заваді реалізації такого підходу завжди стоїть необхідність виконання ряду інших технічних вимог, серед яких найважливіша є робоча частота та ефективність, що визначається саме способом закріплення активного елемента та видом конструкції електроакустичного приладу. В великій кількості конструкцій електроакустичних перетворювачів, призначених для роботи в

рідині, мають місце такі принципові відмінності, що залежність їх параметрів від дії статичного тиску виявляється суттєво неоднаковою. Найпоширеніша на сьогоднішній день класифікація електроакустичних приладів та перетворювачів за типом коливальної системи (циліндричні, стержньові, пластинчаті) не дозволяє охарактеризувати їх конструкції з точки зору особливостей роботи цих конструкцій при наявності великих статичних (гідростатичних) тисків. Найважливішим фактором, який визначає роботу таких приладів, є залежність параметрів їх активних елементів від величини статичного тиску. В зв'язку з цим виявляється слушним ввести доповнюючу класифікацію, яка дозволяє згрупувати конструкції електроакустичних приладів, в т.ч. і перетворювачів, по степені та характеру дії статичного тиску на збуджуючий їх активний матеріал.

Пошуки компромісних рішень при технічній реалізації способу нейтралізації впливу гідростатичного тиску на ефективність приладів привели до появи трьох типів конструкцій акустичних приладів та їх вузлів, а саме – силових, розвантажених та компенсованих. В силових конструкціях внутрішні об'єми активного елемента та корпусу приладу заповнені повітрям або електроізоляційним газом. Активний елемент і міцний корпус таких конструкцій здатні протистояти гідростатичному тиску. Гідростатичний тиск трансформується в навантажених елементах конструкцій в одно-, двох або трьохосовий механічний напружений стан. При цьому найбільша із складових стискуючих зусиль σ_{cm} значно більша (в 10 – 15 разів), ніж той гідростатичний тиск, що їх викликає $\sigma_{cm} \gg p_e$. Відповідно зростають і значення коефіцієнтів A_1 . В силових конструкціях забезпечення механічної міцності здійснюється шляхом збільшення товщини деталей або використанням матеріалів з більш високими характеристиками міцності.

В компенсованих конструкціях активний і всі інші елементи конструкцій при роботі під дією статичного тиску знаходяться в стані всебічного стиснення

$\sigma_{cm} = p_z$. Для цього стану коефіцієнт $A_f = 1$ і механічна міцність деталей конструкції може бути забезпечена без збільшення їх товщини і заміни матеріалу.

Розвантаженими називаються такі конструкції електроакустичних приладів для роботи в рідині, в яких гідростатичний тиск не діє на активний елемент або діє значно слабше, ніж в силових конструкціях. Активний елемент цих конструкцій розвантажено завдяки наявності міцного корпусу та елементів кріплення, які приймають на себе навантаження, що створюються гідростатичним тиском. Для таких конструкцій електроакустичних приладів та їх елементів значення коефіцієнтів A_f знаходиться між тими значеннями, що відповідають компенсованим і силовим конструкціям. Значення механічних напружень, що створюються в елементах конструкцій гідростатичним тиском, можуть досягати декількох тисяч кілограмів на 1 см^2 .

На рис. 2.3 схематично показані прилади таких конструкцій для перетворювачів з різними типами коливальних систем, та наведені вирази для максимальних нормальних σ_n та тангенціальних σ_τ механічних напружень в п'єзокераміці.

Хімічна взаємодія рідини з металами

Взаємодія води, особливо морської, з металевими деталями конструкцій електроакустичних приладів обумовлює виникнення електрохімічної корозії. Швидкість “з’їдання” нею цих деталей по товщині становить 1 – 2 міліметри на рік. Вирішення цієї проблеми при конструюванні електроакустичних приладів полягає в зменшенні руйнівної дії електрохімічної корозії шляхом застосування матеріалів, наприклад, титану та його сплавів, які мало піддаються корозії або відповідних захисних покриттів.

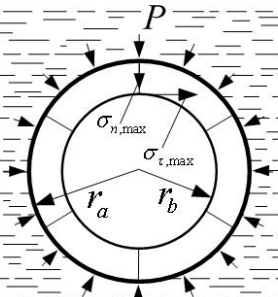
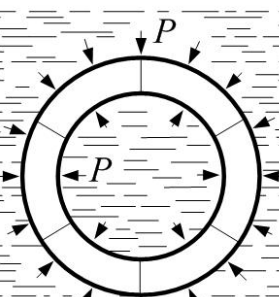
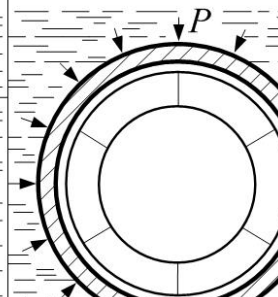
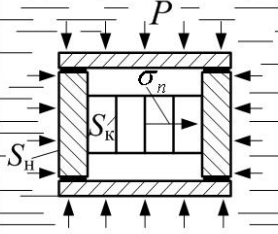
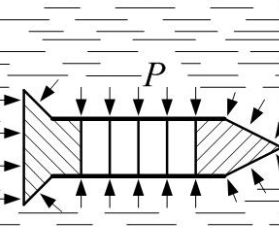
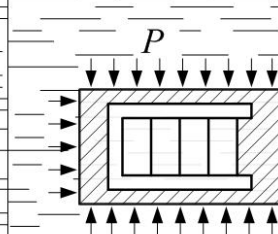
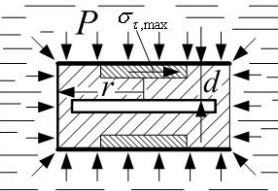
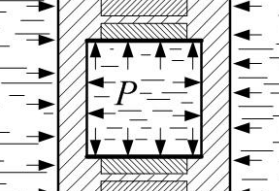
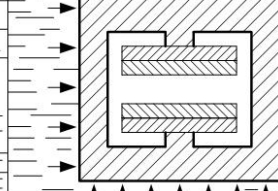
		Конструкція		
		Силова	Компенсована	Розвантажена
Тип коливальної системи	Циліндрична	 $\sigma_{\tau, \max} = P \frac{2r_a^2}{r_a^2 - r_b^2}$ $\sigma_{n, \max} = P$	 $\sigma = P$	 $\sigma = 0$
	Стержньова	 $\sigma_n = P \frac{S_h}{S_k}$	 $\sigma = P$	 $\sigma = 0$
	Пластиначаста	 $\sigma_{\tau, \max} = 1,25P \frac{r^2}{d^2}$	 $\sigma = P$	 $\sigma = 0$

Рис.2.3. Силова, компенсована та розвантажена конструкції приладів

Дифузне проникнення молекул води крізь полімерні матеріали

При конструюванні і виготовленні приладів крім металів та їх сплавів широке застосування знаходять полімерні матеріали. Зокрема технічні марки гум широко застосовуються з метою забезпечення герметизації приладів при роботі їх в рідинах, оскільки питомий хвильовий опір гум близький до питомого хвильового опору рідин. Але при взаємодії полімерних матеріалів з рідиною в процесі експлуатації електроакустичних приладів виникає таке фізичне явище як дифузне проникнення молекул рідини через полімерні матеріали у внутрішню порожнину конструкцій цих приладів. Наслідком проникнення молекул рідини в елементи приладів є зміни їх електричного опору і електричної міцності.

Процес дифузії молекул залежить від глибини занурення електроакустичного приладу в рідину, прискорюючись при її збільшенні. Багаторічний досвід експлуатації таких приладів у воді дозволяє стверджувати, що при герметизації конструкцій приладів гумою С-572 для підтримання незмінним електричного опору ізоляції і внутрішнього опору сталому струму приладу на кожний плановий рік експлуатації потрібно передбачати при конструюванні приладу один міліметр товщини гуми. На сьогоднішній день запропоновано кілька технічних шляхів подолання цієї проблеми при конструюванні електроакустичних приладів. Їх фізичними засадами є або зменшення вологості газу у внутрішній порожнині конструкції приладу, або створення перешкод проникненню в неї молекул рідини. Технічний шлях практичної реалізації першої засади полягає в розміщенні у внутрішній зоні конструкції приладу матеріалів, поглинаючих вологу. Одним з таких матеріалів, застосування яких поширено, наприклад, в гідроакустичних приладах, є селікогель. Друга засада має більш широкий, але й більш складний арсенал конструкторської реалізації. Це може бути виконання вузлу герметизації електроакустичного приладу багатошаровим із одного і того ж полімерного матеріалу з використанням прошарку із якогось гелю між цими шарами з метою

витіснення з простору між ними повітря, яке як відомо, є ефективним акустичним екраном м'якого типу. Таке виконання вузлу герметизації забезпечує більшу гнучкість шарів, а відтак і технологічність конструкції, ніж один суцільний шар такої ж товщини. До більш складних відносяться такі як поєднання при герметизації приладу полімерних матеріалів з металевою фольгою, або заповнення внутрішньої порожнини електроакустичного приладу електроізоляційною рідиною [3].

2.3. Навантаження, які створюються режимом випромінювання звуку (кавітаційні, механічні динамічні, електричні, теплові)

Електроакустична апаратура в залежності від їх призначення має у своєму складі або тракти прийому акустичних сигналів і тракти їх випромінювання, або один із них. Природно, що умови функціонування електроакустичних приладів в режимі випромінювання суттєво відрізняються від таких в режимі прийому і створюють в конструкціях випромінюючих приладів значно жорсткіші навантаження. Електричні напруги, які збуджують випромінюючі електроакустичні прилади, створюють в їх елементах, що деформуються, певні механічні напруження. Спільна дія електричної напруги та механічних напружень призводить до розігріву випромінювачів. Звідси витікає відомий висновок, що потужності, які випромінюються електроакустичними приладами, обмежуються їх тривалими механічними і електричними міцностями та температурами розігріву.

2.3.1. Кавітаційні навантаження.

Одним з видів кавітації є акустична кавітація, яка виникає при проходженні звукової хвилі великої інтенсивності. В цій хвилі під час напівперіодів розрідження утворюються кавітаційні бульки, які різко захоплюються після

переходу в область збільшеного тиску. Це породжує сильні гідродинамічні збурення в рідинах, інтенсивне випромінювання акустичних хвиль та руйнування поверхонь твердих тіл, що межують з рідиною, яка кавітує. Кавітаційні бульки утворюються в тих місцях, де тиск в рідині стає нижче якогось критичного значення P_k , що відповідає порогу кавітації. Для ідеальної однорідної чистої рідини вірогідність спонтанного утворення бульок стає помітною лише при досить великих розтягуючих напруженнях. Наприклад, для води теоретична величина P_k становить $-1,5 \cdot 10^8$ Па. Реальні рідини менш міцні. Так, для ретельно очищеної води максимальне розтягування при температурі 10°C складає $-2,8 \cdot 10^7$ Па. В звичайних умовах розриви суцільної рідини виникають при тисках, лише трохи менших тиску насиченої пари при даній температурі. Низька міцність реальних рідин пов'язана з наявністю в них так званих зародків кавітації – мікроскопічних газових бульок, твердих часток з тріщинами, що заповнені газом, і т.п. Вплив кавітаційних бульбашок на роботу електроакустичних приладів є багатоплановим і повинен бути врахованим при конструюванні приладів [8-14].

Механічні перевантаження конструкцій випромінювачів, які створюються кавітацією, обумовлені наступним. При роботі потужних електроакустичних випромінювачів і антен в рідині на їх випромінюючій поверхні можуть виникати у від'ємний на півперіод розрідження такого розміру, що викличуть появу кавітаційних бульбашок. Суміш рідини і бульбашок має суттєво менший (в 2 – 3 рази) хвильовий опір, ніж опір рідини, у зв'язку з чим різко збільшуються амплітуди коливань електроакустичних приладів і порушуються режими їх роботи. Насичений кавітаційними бульбашками шар рідини, який контактує з випромінюючими поверхнями електроакустичних приладів, по своїй фізичній суті наближається до м'якого акустичного екрану. Тому він перешкоджає випромінюванню акустичної енергії в середовище і акустичний тиск в полі

знижується. При відсутності кавітації зі збільшенням електричної напруги на вході електроакустичних приладів акустичний тиск в полі зростає пропорційно величині напруги, а з появою кавітації зростання акустичного тиску уповільнюється. Подальше збільшення електричної потужності, яка підводиться до електроакустичних приладів, не супроводжується збільшенням акустичної потужності. При значній кавітації випромінювати потужність може навіть зменшитися за рахунок втрат на поглинання та розсіювання звуку кавітаційними бульбашками, а зростання механічних напружень в активних елементах конструкцій електроакустичних приладів може призвести до їх руйнування. При сильній кавітації виникає ерозія, тобто механічне руйнування випромінюючих поверхонь конструкцій електроакустичних приладів, особливо при тривалій їх експлуатації.

Перераховані вище причини і наслідки роботи приладів в умовах кавітації змушують при розробці їх конструкцій шукати рішення щодо запобігання появи кавітації [13, 14]. На жаль, арсенал цих технічних рішень дуже незначний. Першим і найбільш вагомим серед них є обмеження потужності випромінювання звуку значеннями, що відповідають порогу виникнення кавітації. Цей поріг характеризується величиною питомої акустичної потужності I_{don} , при якій кавітація ще не з'являється і залежить як від параметрів рідини (величини заглиблення приладу, температури, вмісту газу, суспензій і т.п.), так і від параметрів електроакустичного приладу (частоти випромінювання звуку, тривалості випромінюваних імпульсів, їх шпаруватості, ступеню нерівномірності розподілу коливальної швидкості та акустичного тиску на випромінюючій поверхні та ін.). В загальному вигляді основні з цих залежностей наведені [3] на рис. 2.4, де на рис. 2.4, а криві відповідають частотам 3, 7, 15, 30, 50 кГц, а на рис. 2.4, б криві 1 – 4 відповідають глибинам 4, 10, 20, 50 м. Залежність порогу кавітації від заглиблення приладу у воді при безперервному випромінюванні визначається виразом [3, 81]

$$I_{don} = 0,3(1 + 0,1h)^2, \quad (2.3)$$

де h вимірюється в метрах.

Друге рішення пов'язане з тим, щоб шляхом відповідного виробу при конструюванні електроакустичного приладу його елементів – електроакустичних випромінювачів та екранів, та характеру збудження перетворювачів забезпечити максимальну однорідність розподілів коливальної швидкості та акустичного тиску на випромінюючій поверхні приладу.

Третє рішення полягає в нанесенні на випромінюючі поверхні електроакустичного приладу антикавітаційного покриття [12-14]. Воно являє собою спеціальну акустичну гуму, швидкість звуку в якій та густина мають значення, близькі до відповідних величин робочої рідини.

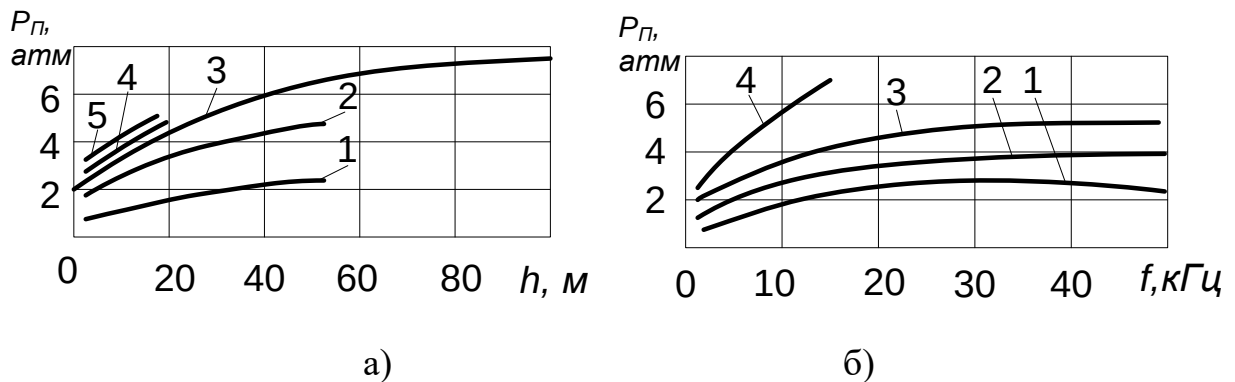


Рис. 2.4. Залежність порогу кавітації від глибини (а) та від робочої частоти (б) приладу

2.3.2. Механічні динамічні навантаження

Механічні навантаження в активних елементах електроакустичних приладів складаються із статичних та динамічних напружень.

Динамічні напруження є циклічними знакозмінними напруженнями, які виникають в акустичних приладах при їх роботі в режимі випромінювання звуку. При побудові конструкцій сучасних електроакустичних приладів, особливо тих, що працюють в рідині в більшості випадків використовують в якості активного

матеріалу п'єзокерамічні матеріали різних складів. П'єзокераміка відноситься до крихких матеріалів з великою кількістю випадкових дефектів (пор, тріщин), які утворюються при її спіканні. Ця особливість визначає великий розкид характеристик міцності п'єзоелементів, їх залежність від габаритних показників, а також їх більш високий опір стисненню, ніж розриву (межа міцності при стисненні приблизно в 16 разів більша межі міцності при розтягуванні). При тривалому впливі як статичних, так і циклічних напружень в п'єзокераміці накопичуються випадкові ушкодження, що залежать від рівня діючих напружень і випадкових значень меж міцності їх матеріалу. Тому динамічні напруження, які виникають у п'єзоелектричній кераміці, не повинні перевищувати відповідну межу міцності. $\sigma_{розт}$.

Динамічні напруження, що виникають в електроакустичному приладі при випромінюванні звуку, визначаються його потужністю випромінювання. Встановимо кількісну залежність між цими величинами. Акустична потужність випромінювання W_a може бути визначена згідно з виразом [3]:

$$W_a = \frac{U^2 n^2}{z_m^2} r_s, \quad (2.4)$$

де U – електрична напруга, яка потрібна для збудження приладу на будь-якій частоті; n – коефіцієнт електромеханічної трансформації приладу; z_m – комплексний механічний опір приладу; r_s – активна складова опору випромінювання приладу. При роботі навантаженого приладу за межами резонансу завжди потрібні більші робочі напруги, ніж на резонансі, оскільки z_m зростає по мірі віддалення від частоти резонансу. Для випадку роботи приладу на резонансній частоті вираз для потужності W_a приймає вигляд:

$$W_a = \frac{U^2 n^2 \eta_{a/m}^2}{\alpha(\rho c)_c S_n}, \quad (2.5)$$

де $\eta_{a/m} = \frac{r_s}{r_m}$ – акустико-механічний коефіцієнт корисної дії; r_m – активний механічний опір приладу; α – безрозмірний коефіцієнт при активній складовій опору випромінювання; $(\rho c)_c$ – питомий хвильовий опір середовища, в якому працює електроакустичний прилад (ρ – густина середовища, c – швидкість звуку); S_n – площа випромінюючої поверхні приладу.

Вираз (2.4) для акустичної потужності може бути представлений через коливальну швидкість v_m поверхні S_n електроакустичного приладу наступним чином:

$$W_a = W_{num} S_n = \frac{1}{2} v_m^2 r_s = \frac{1}{2} \alpha (\rho c)_c v_m^2 S_n.$$

Звідси

$$v_m = \sqrt{\left(\frac{2W_{num}}{\alpha (\rho c)_c} \right)} \quad (2.6)$$

З іншої сторони відомо, що зв'язок між амплітудами напруження σ_m і швидкістю v_m поширення звукової хвилі в напрямі коливань активного елемента електроакустичного приладу має вигляд:

$$v_m = \frac{\sigma_m}{(\rho c)_k B_i}, \quad (2.7)$$

де $(\rho c)_k$ – питомий хвильовий опір активного матеріалу; B_i – коефіцієнт, який залежить від форми коливань, що використовується в акустичному приладі. Таким чином, прирівнюючи вирази (2.6) і (2.7), одержуємо співвідношення, яке пов'язує питому акустичну потужність випромінюючого приладу з максимальними динамічними напруженнями в ньому:

$$\sigma_m = \sigma_{0i} \sqrt{W_{num}}, \quad (2.8)$$

де σ_{0i} – максимальні механічні напруження, які необхідні для випромінювання електроакустичним приладом, що працює на даній формі коливань, питомої потужності $W_{num} = 1 \text{ Вт/см}^2$. При роботі на резонансі

$$\sigma_{0i} = \sqrt{\frac{2(\rho c)_k^2}{\alpha(\rho c)_c} B_i^2} \quad (2.9)$$

Аналіз виразів (2.5) і (2.8) з урахуванням співвідношення (2.9) дозволяє встановити фізичні фактори, дія яких спричиняє появу максимальних механічних напружень в конструкції електроакустичного приладу при роботі його в режимі випромінювання звуку, та витікаючи з аналізу вимоги до конструкції приладу і запропонувати можливі конструкторсько-технологічні шляхи забезпечення їх реалізації. До цих фізичних факторів відносяться: ступінь енергетичної завантаженості випромінюючої поверхні електроакустичного приладу (питома потужність); ступінь завантаженості випромінюючого приладу робочим середовищем (множник $\alpha(\rho c)_c$); форма механічних коливань випромінюючої поверхні приладу (коефіцієнт B_i) та фізичні особливості використаного при побудові приладу активного матеріалу (питомий опір п'єзокераміки). Тому при конструюванні електроакустичного приладу задоволення вимог до його конструкції в частині максимальних механічних напружень може здійснюватись шляхом вибору виду електроакустичного перетворювача, складу його п'єзокерамічного матеріалу, характеру конструктивного виконання приладу в цілому та його основних вузлів зокрема і технології їх складання. Якісний аналіз різних конструкцій дозволяє стверджувати наступне. З точки зору величини максимальних механічних напружень σ_{0i} пріоритет мають прилади, в яких при виборі виду перетворювачів використані стержньові напівхвильові та циліндричні пульсуючі перетворювачі. Згинні циліндричні та прямокутні пластинчаті перетворювачі по цьому показнику будуть мати суттєве (2 – 3 рази) більші значення σ_{0i} . Стержневі перетворювачі без накладок мають менші

значення величини σ_{0i} порівняно з перетворювачами з металевими накладками. Але введення до складу стержньових перетворювачів металевих накладок, тобто виконання їх конструкцій трьохкомпонентними, збільшує ефективність перетворювачів і зменшує резонансний розмір активного елемента конструкції перетворювача. Для реалізації великого значення співвідношення площ поперечних перерізів накладок S_n і п'єзокерамічного S_k стержня $\frac{S_n}{S_k} \geq 10-20$

конструкцією останнього виконують у вигляді або суцільної трубки, або набирають секціонованою із тонких круглих шайб. Монолітні конструкції більш міцні, ніж секціоновані. Якщо у перших допустима питома потужність становить 7 Вт/см^2 , то у других – не перевищує 3 Вт/см^2 .

При виборі складу п'єзокераміки для побудови конструкції електроакустичного приладу слід мати на увазі, що для різних складів п'єзокераміки максимальні механічні напруження σ_{0i} мають однаковий порядок і відрізняють на 8 – 10 %.

Для збільшення динамічної міцності конструкції електроакустичного приладу в його активному елементі попередньо створюють сталі стискуючі напруження $\sigma_{арм}$, підсилюючи (армуючи) елемент більше міцним, ніж кераміка, матеріалом, наприклад, металом. Ці стискуючі напруження $\sigma_{арм}$ називають напруженнями армування. Якщо до зміцнення максимальна амплітуда динамічних напружень становила, наприклад, $\sigma_{m1} = 10 \text{ МПа}$, а напруження армування були вибрані величиною $\sigma_{арм} = 12 \text{ МПа}$, то після зміцнення можливі механічні напруження будуть мати амплітуду $\sigma_{m2} = 22 \text{ МПа}$.

Способи та технології армування п'єзокерамічних електроакустичних приладів залежать від виду приладів [3, 4, 80-83]. Електроакустичні прилади, які

мають активний елемент циліндричної форми, можуть бути армовані трьома способами.

Перший з них полягає в тому, що на п'єзокерамічне кільце насаджується за допомогою спеціального обладнання через шар спеціальної технічної гуми нагрітий металевий бандаж у вигляді тонкого кільця, яке при охолодженні створює задані напруження стиснення в п'єзокерамічному кільці.

При другому способі використовується намотка на п'єзокерамічне кільце з розрахованим зусиллям, яке відповідає заданому значенню $\sigma_{арм}$, нитки із скловолокна з наступним її обволіканням вибраним зв'язуючим.

Третій спосіб полягає в намотці на п'єзокерамічне кільце з розрахованим зусиллям через тонку прокладку із електроізоляційного матеріалу, наприклад, гетинаксу, металевої, частіше всього бронзової, струни. Останні два способи армування теж потребують для своєї реалізації спеціального обладнання, більш простішого, ніж перший спосіб.

Електроакустичні прилади у вигляді стержньових перетворювачів трьохкомпонентної конструкції звичайно армують за допомогою осьової стяжки та гайок. Стяжка проходить через центральні отвори п'єзокерамічних елементів. Стяжка і гайка стягують між собою з визначеним зусиллям випромінюючу і тильну накладку перетворювача. Стяжки стержньових і суцільні бандажі циліндричних перетворювачів виготовляють звичайно із нержавіючої сталі і сплавів титану.

В конструкціях пластинчатих електроакустичних приладів армування виконується рідко і здійснюється, при необхідності, або металевою струною, або попереднім згином. Напруження армування вибирають в залежності від потужності випромінювання, яка вимагає, в діапазоні значень 5 – 25 МПа.

2.3.3. Електричні навантаження

Як і в будь-якого іншого електричного приладу, конструкція електроакустичного приладу електроакустичної апаратури має певну електричну міцність, величина якої обмежує випромінювання приладом акустичної потужності. Електричне коло електроакустичного приладу звичайно складається із ліній комунікацій і його активного елементу. Вимоги до електричної міцності ліній комунікації задовольняються відповідним вибором при конструюванні приладу проводів та кабелів. Із задоволенням вимог щодо електричної міцності активних елементів електроакустичних приладів ситуація значно складніша. Досвід експлуатації електроакустичних приладів свідчить, що однією із основних причин погіршення електричних параметрів цих приладів є зволоження ізоляції їх активних елементів. Пояснюється це як руйнуванням герметичної оболонки приладів, так і зволоженням електричної ізоляції активних елементів в результаті дифузії рідини через полімерні деталі герметизуючої оболонки. Втрата електричної міцності активного елемента може статися шляхом електричного пробоя між електродами п'єзокерамічних елементів. Він може траплятися через матеріал п'єзокераміки, якщо напруженість електричного поля в ньому, створена прикладеною ззовні активного елемента збуджуючою електричною напругою, перевищить електричну міцність вибраного для побудови конструкції складу п'єзокераміки. В цьому випадку вимоги до електричної міцності конструкції електроакустичного приладу забезпечується відповідним вибором складу п'єзокераміки та відстані між електродами п'єзоелементів (товщиною п'єзоелементів). Електричний пробій активного елемента може трапитися по його поверхні (поверхневий розряд), якщо електрична міцність середовища, в якому розміщується неізольований активний елемент, або електрична міцність електроізолюючих матеріалів, що наносяться на поверхню активного елемента, будуть меншими, ніж підведена до активного елемента збуджуюча електрична напруга. В цьому випадку вимоги до електричної міцності конструкції

електроакустичного приладу забезпечується шляхом вибору відповідних ізолюючих матеріалів та жорстким контролем якості технологічних операцій при складанні активних елементів. Особливе значення для забезпечення електричної міцності електроакустичних приладів при роботі їх в рідинах набуває якість герметизації конструкцій приладів, оскільки збільшення вологості у внутрішній порожнині конструкції, де розміщується активний елемент, є однією з основних причин появи повневіх пробіів. Ця якість забезпечується при конструюванні приладів шляхом вибору типу конструктивного виконання електроакустичного приладу в частині заповнення його внутрішньої порожнини електроізоляційними газом чи рідиною, типу герметизації, матеріалів та конкретних технічних рішень побудови вузла герметизації.

Зниження електричної міцності ізоляції електроакустичних приладів, крім її зволоження, можливо ще також з причини природного (теплого) старіння електроізоляційних матеріалів та руйнування ізоляції під дією часткових розрядів. Невисока робоча температура електроізоляції електроакустичних приладів (до 65°C) та електроізоляційні матеріали, що в теперішній час застосовуються, забезпечують строк служби електроізоляції не менше 25 років [3, 81, 83]. Це дозволяє не брати до уваги при конструюванні електроакустичних приладів природне старіння матеріалів. Існуюча перевірка електроізоляції електроакустичних приладів на напругу виникнення в ній часткових розрядів виключає часткові розряди небезпечної інтенсивності. З урахуванням відносно малого сумарного часу знаходження ізоляції під дією електричної напруги порівняно із заданим строком служби електроакустичних приладів. Це дозволяє знехтувати і електричним старінням ізоляції.

В процесі експлуатації електроакустичних приладів, особливо в рідині, волога поступово проникає через вологозахисну оболонку його конструкції і поглинається всім об'ємом електроізоляційних матеріалів пропорційно їх

коефіцієнтам волого розчинності. При їх зволоженості вище якоїсь критичної величини виникає різке падіння електричної міцності ізоляції. Воно обумовлене утворенням водяної плівки на поверхні п'єзокерамічних елементів для конструкційних електроакустичних приладів, внутрішня порожнина яких заповнена газом чи маслом, або виникненням відшарування в твердій ізоляції конструкцій з використанням компаундів. При відсутності плівки рідини, яка перекриває простір між електродами, електрична міцність твердої ізоляції може знижуватись плавно, але прогресивно у відповідності зі збільшенням діелектричних втрат в ізоляції в залежності від зростання в ній кількості вологи.

2.3.4. Теплові навантаження, які діють на конструкції приладів

Нагрівання конструкцій електроакустичних приладів відбувається з таких причин [84-90]:

- Внутрішні механічні втрати в п'єзокераміці – тепловиділення, спричинене тертям у матеріалі;
- Діелектричне розсіювання – втрати енергії в п'єзокераміці під впливом змінного електричного поля;
- Демпфування – зниження енергії механічних коливань у п'єзокерамічному матеріалі;
- Протікання змінного електричного струму через п'єзокераміку, що спричиняє її нагрівання;
- Передача тепла від пасивної накладки та робочого інструменту;
- Нагрівання внаслідок впливу робочого середовища;
- Наявність клейового з'єднання, яке може впливати на розподіл та передачу тепла.

Клейове з'єднання виконує функцію додаткової жорсткості, маси та демпфера, знижуючи активну складову споживаної енергії [89]. Завдяки низькій

теплопровідності клей перешкоджає передаванню теплоти від п'єзокераміки до металевих елементів, водночас його максимальна робоча температура залишається низькою [90].

Ще одним фактором, що впливає на теплові напруження та обґрунтовує необхідність дослідження теплового поля перетворювача, є безпечна робоча температура п'єзокераміки. Вона є нижчою за номінальну робочу температуру, зазначену в технічних характеристиках матеріалу, та приблизно дорівнює половині температури Кюрі. Значення цієї температури визначається не лише типом п'єзокераміки, а й рівнем попереднього напруження. Стискуючі напруження не повинні перевищувати критичний рівень, оскільки це може спричинити механічну деполяризацію. У протилежному випадку механічні втрати в кераміці суттєво зростуть, що призведе до її перегріву [91].

У дослідженні [90] було проведено порівняння двох типів клейового з'єднання для двошарового перетворювача. В якості скріплюючого шару використовували епоксидний клей та теплопровідну епоксидну смолу з додаванням срібла. Досліджували підвищення температури перетворювача залежно від інтенсивності збуджуючого електричного поля. Результати показали, що у першому випадку температура підвищилася майже на 120°C більше, ніж при використанні теплопровідного клею.

Ще на початку XX століття Пол Ланжевен запропонував комбінувати та попередньо напружувати п'єзоелементи разом із металевими деталями, тобто застосовувати армування. Ця конструкція має кілька переваг порівняно з клейовим з'єднанням: вона запобігає виникненню розтягувальних напружень, що можуть спричинити тріщини в крихкій кераміці, а також усуває ізолюючі клейові шари, які можуть збільшувати ємність. Механічне попереднє напруження покращує п'єзоелектричне зчеплення, а електроди можна зручно підключити через додаткові вставлені електродні пластини. Однак найбільш важливою перевагою для теплових процесів є те, що тепло, що утворюється в п'єзокераміці

внаслідок втрат, ефективніше передається до металевих елементів, які забезпечують його відведення в оточуюче середовище.

Важливим аспектом є також вибір типу перетворювача. З точки зору тепловиділення в нерезонансному режимі (коли враховуються лише діелектричні втрати) циліндричні перетворювачі нагріваються менше, ніж стержневі, у яких п'єзокерамічний елемент має форму куба або циліндра [88]. Це пояснюється тим, що циліндричні перетворювачі мають більшу площу контакту з навколишнім середовищем, що сприяє ефективнішому тепловідведенню.

У стержневих перетворювачах, завдяки попередньому механічному напруженню, яке створюється стягувальним болтом (за відсутності клейового з'єднання), передача тепла від п'єзокераміки до металевих шарів конструкції покращується.

Для розуміння механізмів нагрівання перетворювачів необхідно визначити основні причини тепловиділення. Деякі з них можна скоригувати шляхом оптимізації матеріалу електродів, вибору альтернативного способу з'єднання перетворювача або застосування іншого типу п'єзокераміки.

Вплив нагрівання на параметри електромеханічних приладів та елементів їх конструкцій

Нагрівання п'єзокераміки та перетворювача в цілому може як ускладнювати роботу пристрою, так і повністю вивести його з ладу. Наслідки підвищення температури можна розділити на три основні групи: обмеження, зміна параметрів і характеристик, а також незворотні наслідки.

До обмежень, спричинених нагріванням перетворювача, належать:

- обмеження за тривалістю та режимом роботи. Наприклад, для мінімізації теплових ефектів під час випробувань промислового перетворювача для обробки використовувалося безперервне хвильове збудження [92].

- Зміна режиму роботи. У медичних застосуваннях п'єзоелектричних перетворювачів часто переходять на імпульсне збудження, що дозволяє зменшити перегрів. Однак у реальних умовах експлуатації потужних пристроїв такий підхід може бути складним для реалізації.
- Обмеження вихідної потужності [93] та вихідного струму. У терапевтичних і хірургічних п'єзокерамічних перетворювачах було показано [94], що при потужності 25 Вт температура на поверхні п'єзокераміки підвищується на 120°C. При збільшенні поданої електричної потужності до 100 Вт температура на поверхні перевищує 500°C, а у внутрішніх шарах п'єзокераміки досягає понад 700°C. Такі рівні нагріву є критичними і можуть створювати дискомфорт при використанні медичних приладів.
- Обмеження амплітуди коливань та коливальної швидкості [95, 96]. Дослідження показали, що максимальна швидкість коливань спостерігається при підвищенні максимальної температурної точки лише на 20°C відносно кімнатної температури. Подальше збільшення подачі електричної енергії призводить до того, що вся додаткова енергія витрачається виключно на нагрівання [95].

Наступна група проблем, пов'язаних із підвищенням температури, стосується зміни параметрів пристрою та характеристик матеріалів унаслідок температурного впливу. До основних факторів належать:

- зміна робочої частоти [97, 98] та зсув амплітудно-частотних характеристик у нижній частотний діапазон. Це явище зумовлене зміною швидкості поширення звукових коливань у металі конструкції та зміною характеристик п'єзокераміки. Крім того, спостерігаються стрибкоподібні зміщення частоти [85] і додаткові паразитні коливання. Важливу роль у цьому процесі відіграє також зміна діелектричних та п'єзоелектричних характеристик

п'єзокераміки при підвищенні температури [99]. Нелінійні реакції, такі як дрейф резонансної частоти, частково контролюються керуванням сигналу з генератора, адаптованого до перетворювача, наприклад, використанням імпульсного режиму замість безперервного збудження [92].

- міна електричного опору пристрою. Амплітудні коливання імпедансного сигналу пов'язані з температурною залежністю ємності п'єзоелектричного приладу. Також, зміщення резонансних піків, яке викликане температурними змінами, не є сталим в усьому частотному діапазоні, і його величина збільшується з підвищенням частоти. [100-101].
- порушення узгодження з електронним генератором унаслідок зміни електричної ємності п'єзоелементів, що може призводити до нестабільної роботи пристрою [102].

Електрична ємність деяких марок п'єзокераміки збільшується в 1,5 рази при підвищенні температури до 100°C . Діелектричні втрати п'єзокераміки зменшується з підвищенням температури. Згідно з даними [103], тангенс кута діелектричних втрат знижується з 0,11 до 0,07 при температурі 100°C .

Виробники PIS для м'якої та твердої п'єзокераміки PZT надають залежності її параметрів від температури, при підвищенні до 160°C .

У стандарті IEEE 1988 року [104] пропонувалося розраховувати температурні коефіцієнти для п'єзокерамічних констант (еластичної, п'єзоелектричної та діелектричної), оскільки це важливо для амплітудно-частотних характеристик. Обчислення вимірних результатів проводять двома методами. Перший метод передбачає диференціювання рівняння швидкості або частоти ультразвуку від температури. Другий метод передбачає обчислення констант для кожної з кількох температур і знаходження їх коефіцієнтів шляхом апроксимації кривої.

Властивості п'єзокераміки першого покоління демонструють особливу нестабільність при підвищенні температури [105], а п'єзоелектричні коефіцієнти м'якої п'єзокераміки є більш чутливими до температурних змін [106, 107]. Зниження ефективності п'єзокераміки при підвищеній температурі вимагає збільшення напруги, необхідної для нормальної роботи системи.

Одним із факторів, що може призвести до змін параметрів перетворювача, є різниця в коефіцієнтах лінійного теплового розширення матеріалів. Коли перетворювач експлуатується при високій температурі (незалежно від того, чи є це наслідком втрат потужності, чи підвищення температури навколишнього середовища), мається на увазі температура до 100°C (оскільки коефіцієнт теплового розширення часто розраховується саме для таких температур). У таких умовах матеріали піддаються розширенню, і для п'єзокераміки коефіцієнт теплового розширення приблизно в десять разів менший, ніж у металів (наприклад, $\alpha_{сталь} = (11.5 - 13) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_{пк} = (1 - 4) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) і тому розширення матеріалів буде нерівномірним. Це призводить до механічних напружень та деформацій, оскільки п'єзокераміка, через її значно нижчий коефіцієнт теплового розширення, не може рівномірно адаптуватися до розширення металевих компонентів. Необхідно враховувати, що при рівномірному тепловому полі в перетворювачі, яке охоплює всі його компоненти (особливо для великих робочих циклів), попередньо створене напруження в п'єзокераміці, може бути визначене стягуючим болтом.

Перегрівання викликає незворотні змін у п'єзокераміці, серед яких можна виділити такі:

- Деполяризацію, теплове старіння та деградація. При деградації відбувається зниження електричного опору п'єзокераміки, погіршенні її п'єзоелектричних властивостей і збільшенні струму

витоку [108, 109]. Для п'єзокераміки PZT характерне швидке термічне старіння при температурах понад 200°C, з точкою Кюрі на рівні 386°C.

- Зниження електричної міцності п'єзокераміки, що може призвести до теплового електричного пробоя [100-103].
- Механічне розтріскування зразків та плавлення елементів електричного монтажу в перетворювачі [110].

Загалом, управління п'єзоелектричними матеріалами при великих рівнях потужності неминуче призводить до виникнення нелінійних і теплових ефектів, які потрібно враховувати для забезпечення точності вимірювань і ефективного контролю роботи пристроїв. У режимі малих сигналів п'єзоелектричні матеріали зазвичай демонструють лінійну поведінку і підкоряються ізотермічним або адіабатичним умовам. Але при підвищенні робочої напруги і випромінювання більшої потужності теплові умови можуть суттєво змінюватися, що призводить до нагрівання конструкції [111].

- Коротке замикання (електрична дуга). Якщо на керамічні кристали подається достатньо висока напруга або якщо дві провідні поверхні з протилежними полярностями розташовані надто близько одна до одної, може виникнути дуга, що призведе до короткого замикання. Це може викликати локальну деполяризацію через різке підвищення температури, що в свою чергу може призвести до пошкодження кристала.

Для підвищення ефективності приладу важливо зменшити втрати енергії, які призводять до нагріву. Якщо п'єзокераміка під час експлуатації нагріється до температури від 150°C до 180°C, перетворювач буде поступово втрати свої робочі характеристики через зміну властивостей п'єзокерамічного матеріалу. Наприклад, для п'єзокераміки типу PZT-8, з температурою Кюрі 300°C,

оптимальна робоча температура становить від 20°C до 60°C для всіх режимів, але не повинна перевищувати 90°C [111].

Варто зауважити, що зменшення температури нагріву перетворювача не призведе до збільшення його ККД. Це пояснюється тим, що ефективність перетворення енергії залежить, і від властивостей п'єзокераміки, і від конструктивних характеристик самого перетворювача, але на ці фактори неможливо вплинути без суттєвих змін у початковій конструкції. Однак, зниження робочої температури може призвести до збільшення вихідної потужності, оскільки перетворювач здатен витримувати більшу вхідну потужність при зниженій температурі.

Розподіл на обмеження, зміну параметрів перетворювача та незворотні наслідки є доволі умовним, оскільки зміна одного з параметрів компонента системи може спричинити порушення та призвести до інших наслідків.

Через специфічні властивості п'єзокераміки, зокрема низьку теплопровідність і високу теплоємність, виникає проблема перегріву в ультразвукових п'єзокерамічних пристроях. Часто для того, щоб п'єзокераміка охолола, необхідно значно більше часу для її самостійного охолодження. Це особливо важливо для перетворювачів, які працюють у безперервному режимі або на великих потужностях, а також для конструкцій з обмеженою поверхневою площею.

2.4. Зовнішній статичний тиск і конструкторські способи нейтралізації його впливу

Серед усіх експлуатаційних навантажень найбільший вплив на ефективність, розміри, масу, а відтак і вартість електроакустичних приладів має величина зовнішнього робочого статичного тиску [3, 4, 6, 81, 83].

В більшості конструкцій електроакустичних приладів мають місце такі принципові відмінності, що залежність параметрів цих приладів від дії зовнішнього статичного тиску виявляється суттєво неоднаковою. Найбільш поширена в наш час класифікація електроакустичних приладів по типу коливальної системи (циліндричні, стержневі, пластинчасті) не дозволяє охарактеризувати ці прилади з точки зору особливостей їх роботи при великих зовнішніх статичних тисках. Найбільш важливим фактором, який визначає роботу електроакустичного приладу під дією зовнішнього статичного тиску, є залежність параметрів його активного елемента від величини тиску. Тому було визнано необхідним ввести доповнюючу класифікацію, згідно з якою електроакустичні прилади групуються по степені і характеру дії зовнішнього статичного тиску на збуджуючий ці прилади активний матеріал.

Таким чином, по способам нейтралізації впливу зовнішнього статичного тиску на ефективність електроакустичних приладів всі можливі конструкції їх, що використовують будь-які форми коливань, можуть бути розподілені (рис. 2.3) на три групи – силові, компенсовані та розвантажені [3, 4, 6, 81, 83].

Основні різновиди сучасних силових конструкцій циліндричних, пластинчастих та сферичних електроакустичних приладів приведені на рис. 2.5 (циліндричні прилади) та рис. 2.6 (*а* – пластинчастий, *б* – сферичний) [3]. Цифрові позначення на них відповідають наведеним на рис. 2.2. В цих конструкціях зовнішній статичний тиск трансформується в активному елементі в загальному

випадку в двовісне механічне напруження. Аналіз наведених силових конструкцій показує, що внутрішні їх об'єми заповнені електроізоляційним газом, який одночасно виконує і роль внутрішнього акустичного екрану. Герметизація і електроізоляція активних елементів силових конструкцій від корпусних деталей здійснюється сукупностями шарів полімерних матеріалів та металів. Серед наведених на рис. 2.5 і 2.6 силових конструкцій найбільші зміни параметрів під впливом напруженого стану, який створюється зовнішнім статичним тиском, мають конструкції циліндричних електроакустичних приладів.

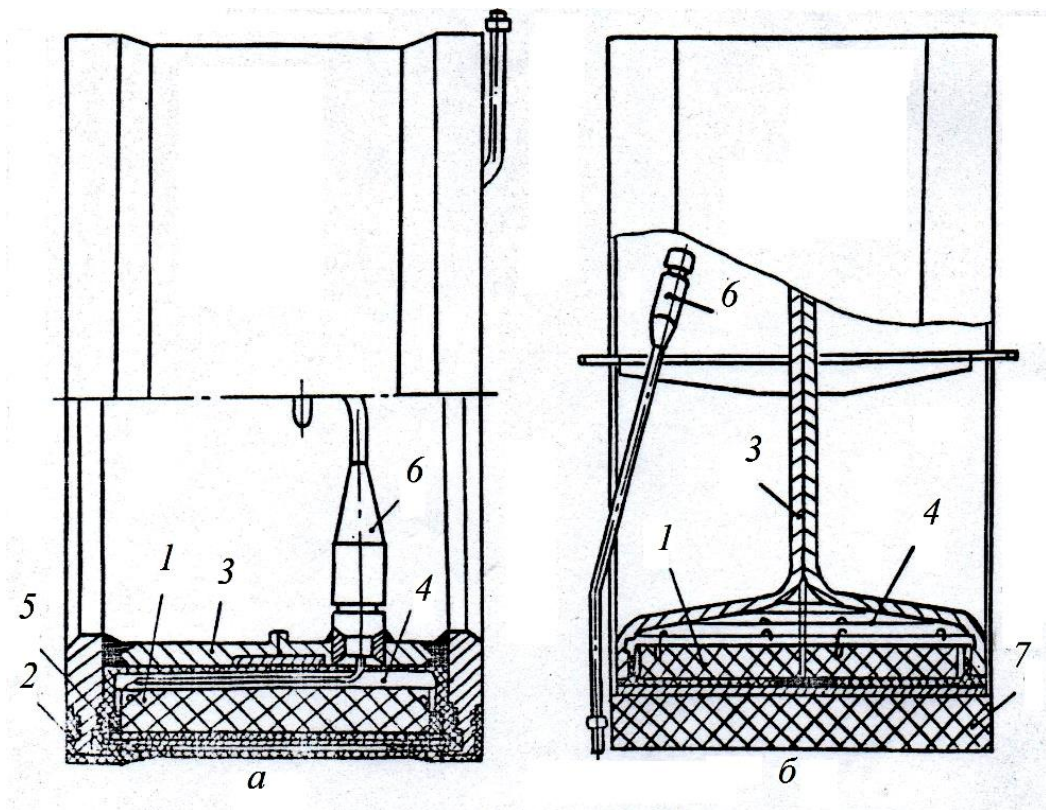


Рис. 2.5. Типові конструкції циліндричних електромеханічних приладів

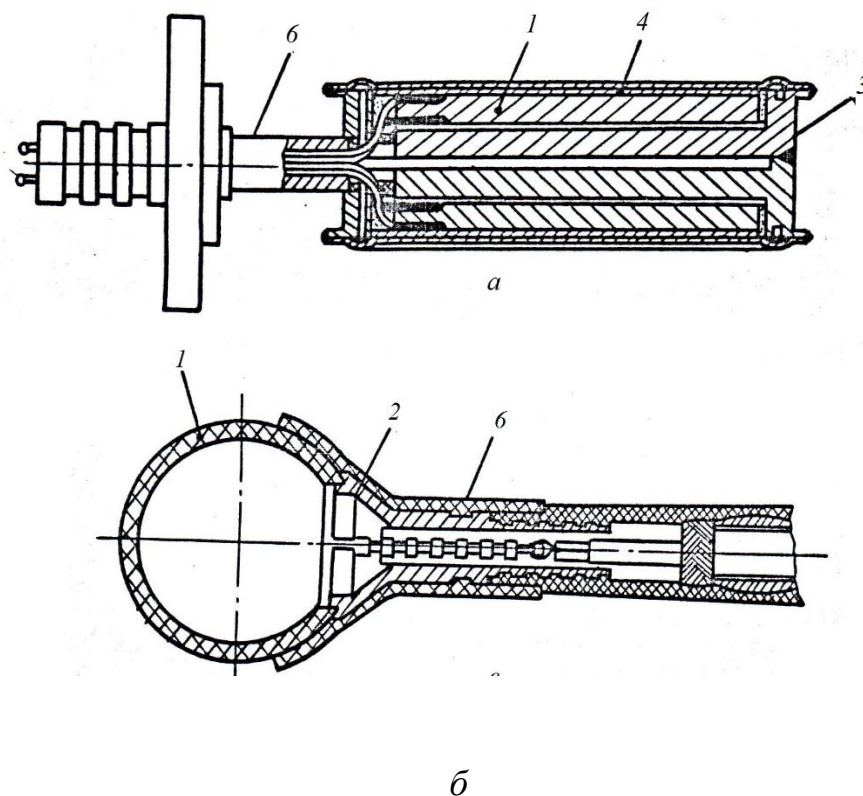


Рис. 2.6. Типові конструкції *а* – пластинчастого, *б* – сферичного електромеханічних приладів

Основні типи компенсованих конструкцій циліндричних та стержневих електроакустичних приладів представлені відповідно на рис. 2.7 та 2.8. Цифрові позначення такі ж, як і на рис. 2.2. В них активний елемент, як і всі інші елементи конструкції, при роботі під зовнішнім статичним тиском знаходяться в стані всебічного стиснення. Електроізоляція і герметизація компенсованих конструкцій може бути здійснена шарами полімерних матеріалів (рис. 2.7, *а, в* і рис. 2.8 *а*), а також поєднанням шарів металів з електроізоляційними рідинами і полімерними матеріалами (рис. 2.7, *б* і рис. 2.8, *б, в*).

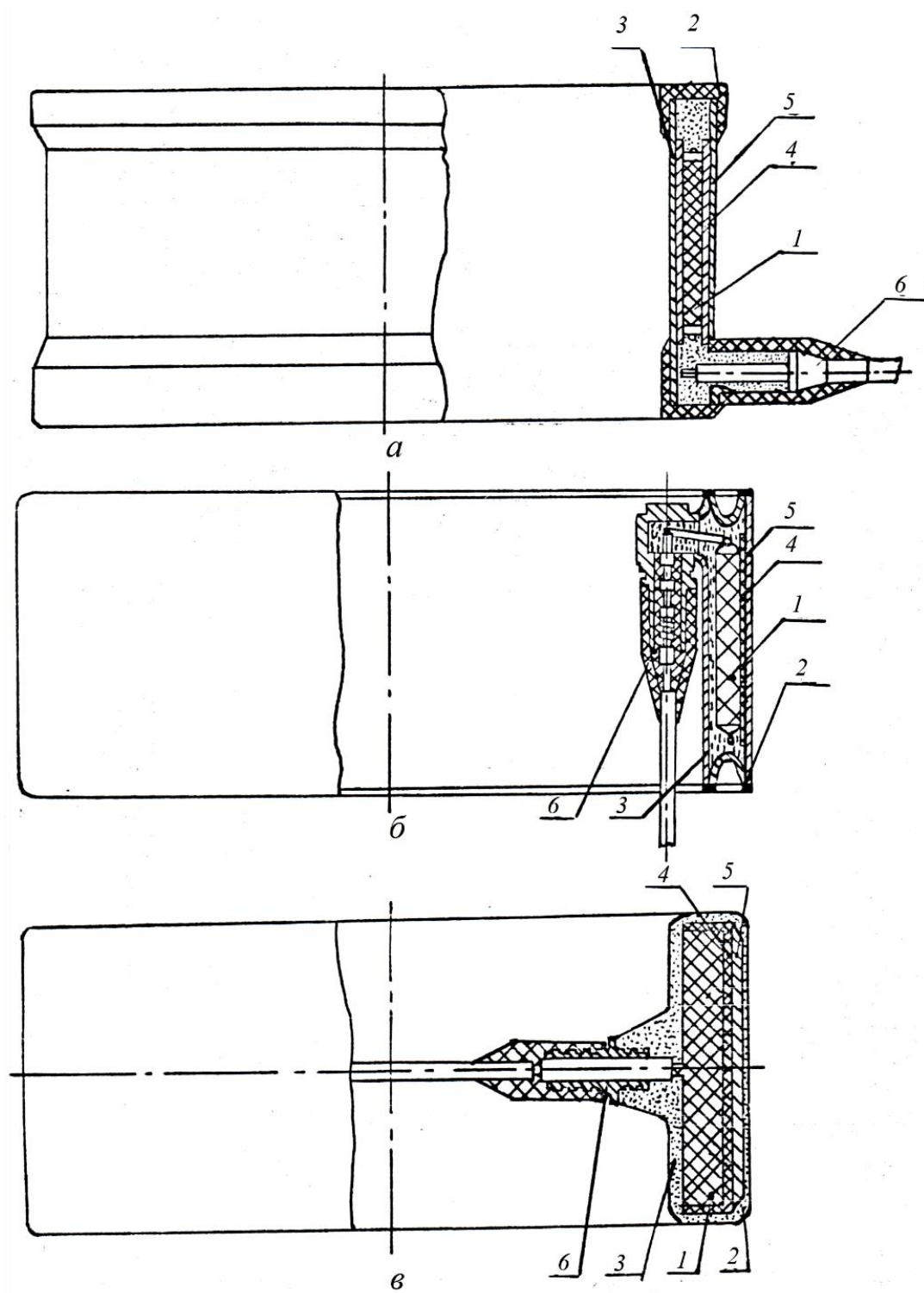


Рис. 2.7. Основні типи компенсованих конструкцій циліндричних приладів

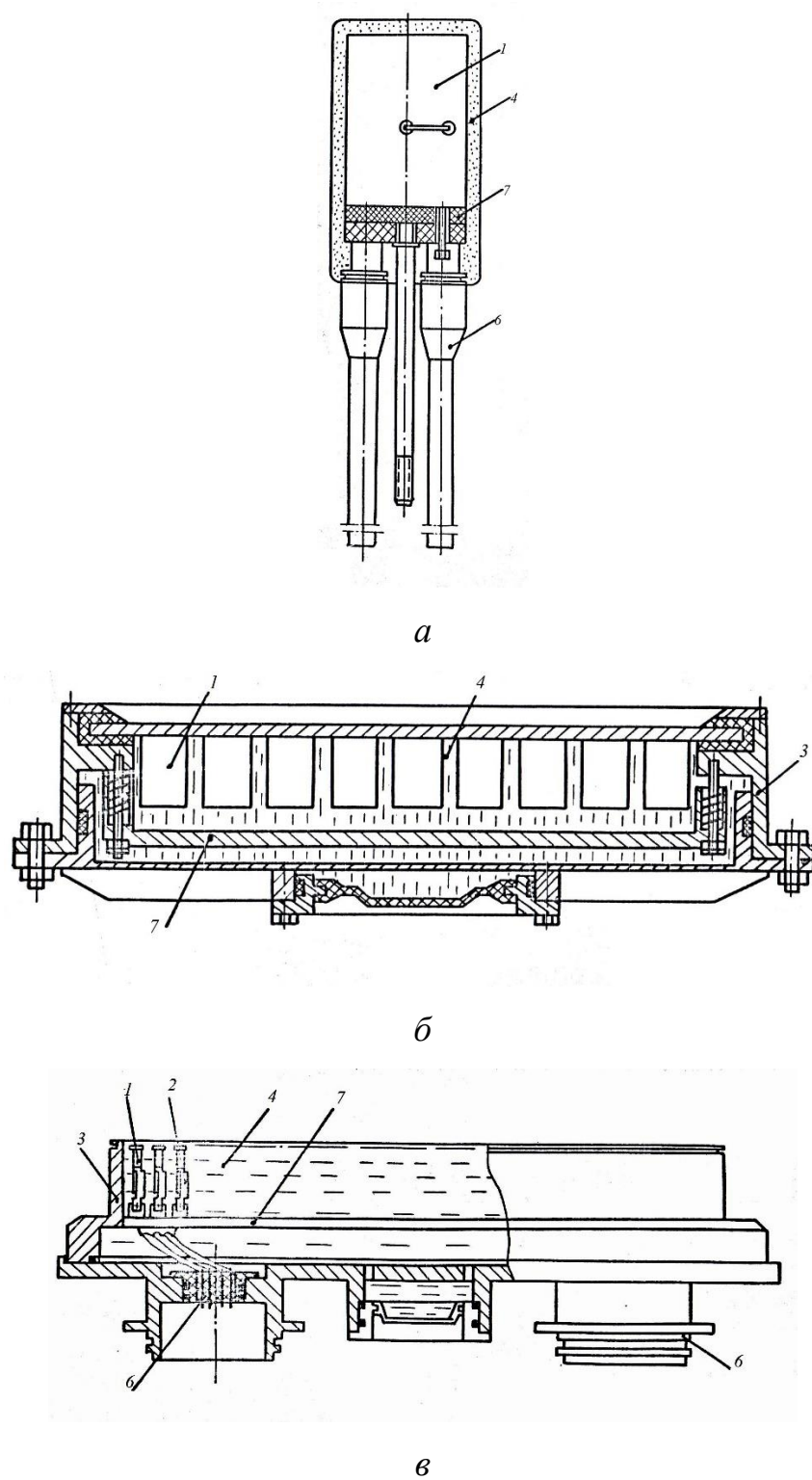


Рис. 2.8. Основні типи компенсованих конструкцій стержневих приладів

Електроакустичні параметри компенсованих конструкцій мають найменші зміни під впливом зовнішнього статичного тиску, оскільки в них суттєво можуть змінюватись лише акустичні параметри екранів. В той же час при роботі під великим зовнішнім тиском компенсовані конструкції електроакустичних приладів можуть забезпечити менші порівняно з силовими розвантаженими конструкціями маси і вартості приладів. Однак, площі поверхонь, які потребують екранування та герметизації полімерними матеріалами, у компенсованих конструкціях мають суттєво більші величини, ніж у силових. Це обумовлює більші втрати енергії в екранах і елементах герметизації, а відтак і трохи меншу ефективність.

Основні різновиди сучасних розвантажених конструкцій електроакустичних приладів зображені на рис. 2.9 [3, 4, 6, 81, 83] (*а* – циліндричний прилад; *б* – прилад на стержневих перетворювачах) та 2.10. Цифрові позначення відповідають таким, що й на рис. 2.2.

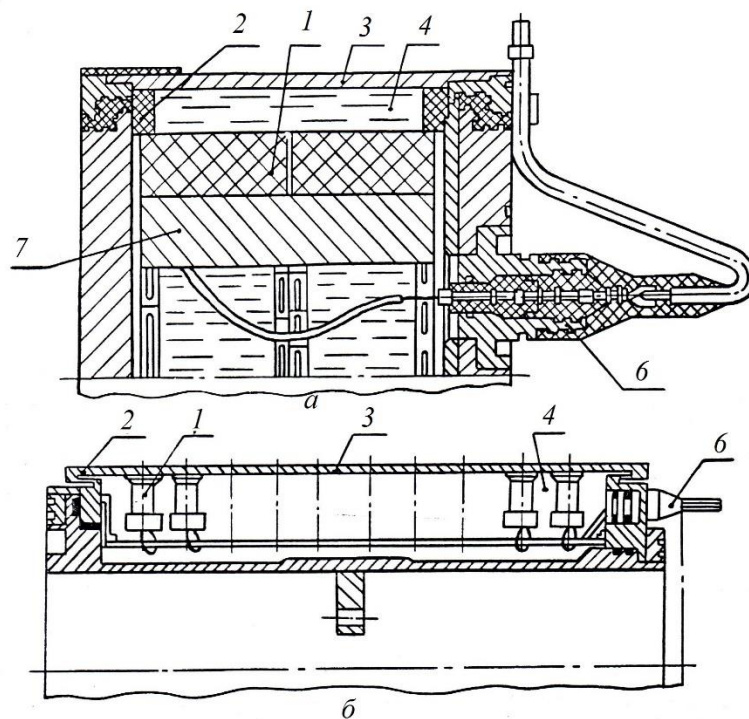


Рис. 2.9. Розвантажені конструкції циліндричних електроакустичних приладів

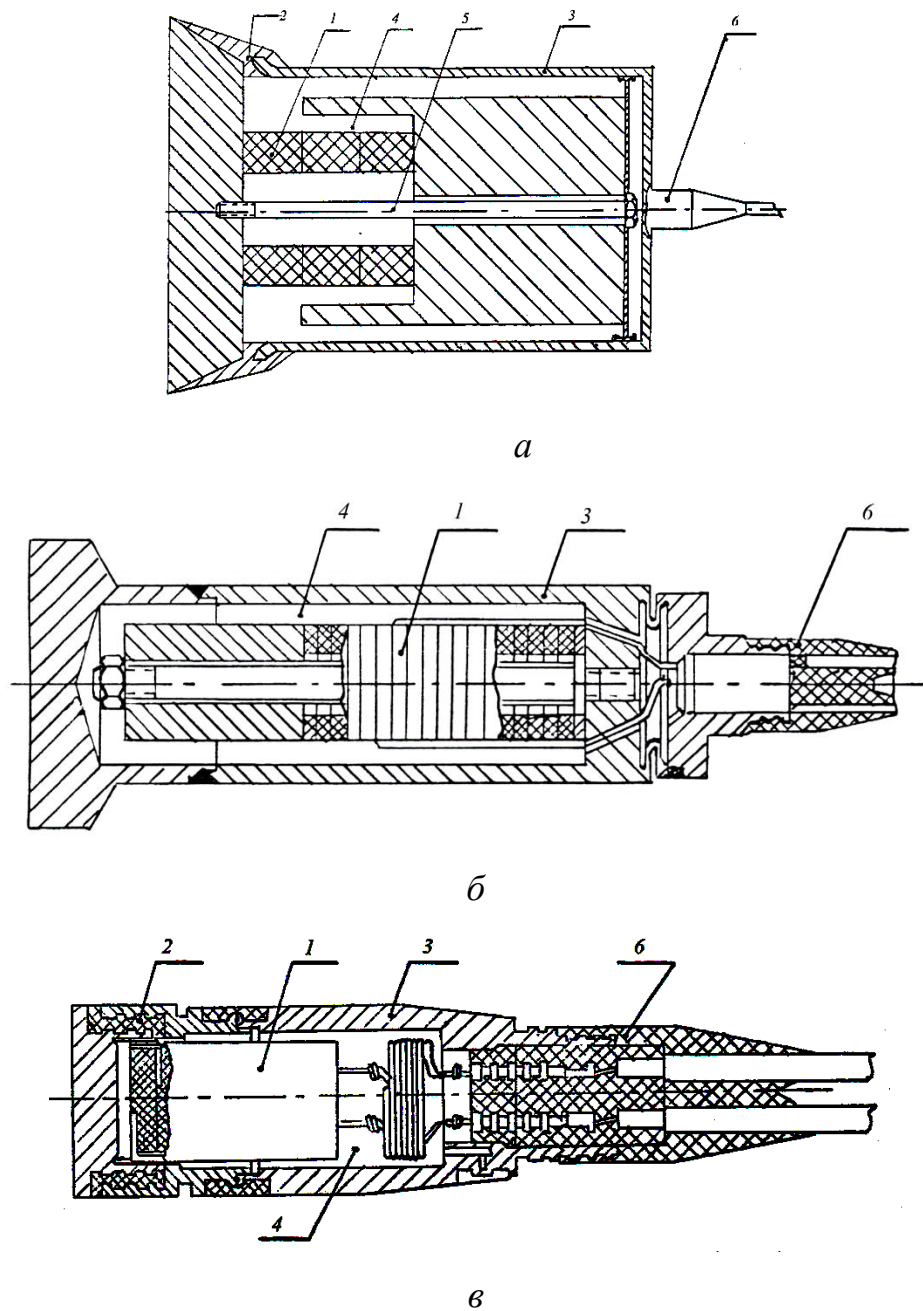


Рис. 2.10. Розвантажені конструкції стержневих електроакустичних приладів

В розвантажених конструкціях зовнішній статичний тиск або не діє на активний елемент, або діє слабше, ніж в силових конструкціях, які були розглянуті вище. Аналіз наведених конструкцій свідчить про те, що активний елемент у всіх випадках розвантажено завдяки наявності міцного корпусу та елементів кріплення. Саме вони приймають на себе навантаження, які

створюються зовнішнім статичним тиском. Внутрішній об'єм розвантажених конструкцій частково або повністю заповнений газом, що виконує роль внутрішнього акустичного екрана (у стержньових електроакустичних приладів), або електроізоляційною рідиною (у циліндричних приладів). Електроакустичні параметри розвантажених конструкцій електроакустичних приладів можуть змінюватись під впливом зовнішнього статичного тиску тільки внаслідок змін параметрів кріплень активних елементів.

2.5. Довготривала механічна міцність конструкцій електроакустичних приладів і конструкторські рішення щодо її забезпечення

Для забезпечення довготривалої працездатності електроакустичних приладів в склад їх конструкцій в доповнення до активного елементу (вузла перетворення енергії) вводяться вузли забезпечення герметизації, електричної і механічної міцності [3, 4, 6, 81, 83].

Завданням функціонального вузла механічної міцності є забезпечення виконання в будь-який час і при всіх умовах експлуатації того, щоб сумарні механічні напруження σ в конструкції приладу були з заданою вірогідністю $P(t_{експ.})$ меншими граничних механічних напружень $\sigma_{гр}$:

$$\left[\sigma < \sigma_{гр} \right]_{P(t_{експ.})}. \quad (2.10)$$

Функціональні вузли забезпечення механічної міцності електроакустичних приладів включають в себе всі елементи їх конструкцій. Незалежно від типу конструкції і форми коливань в кожний вузол входять такі основні конструкційні вузли (рис. 2.2) як активний елемент 1, його кріплення до корпусу приладу 3, електричний монтаж активного елемента і корпус приладу.

У випадку невиконання умови (2.10) здійснюється механічне руйнування вузлів, які входять в функціональний вузол забезпечення механічної міцності.

Наслідком цього може бути зміна опору механічних втрат $r_{\text{м.вт}}$ приладу, зміна форми коливань активного елемента і його резонансної частоти ω_p , а також втрата стійкості конструкції. Слід відмітити, що зміні форми коливань та втраті стійкості приладу завжди буде передувати зростання опору механічних втрат в місцях початку руйнування, яке спостерігається вже на самих ранніх стадіях руйнування. На рис. 2.11, а наведені данні про зміни $r_{\text{м.вт}}$ п'єзоелементів, обумовлені накопиченням механічних ушкоджень при їх тривалій експлуатації, в залежності від числа N знакозмінних циклів напруження. На рис. 2.11, б показані зміни коефіцієнта втрат $\eta = 1/Q$ та міцності σ гуми на основі бутилкаучуку при тривалій експлуатації в умовах дії знакозмінних напружень, які супроводжуються розігрівом зразків.

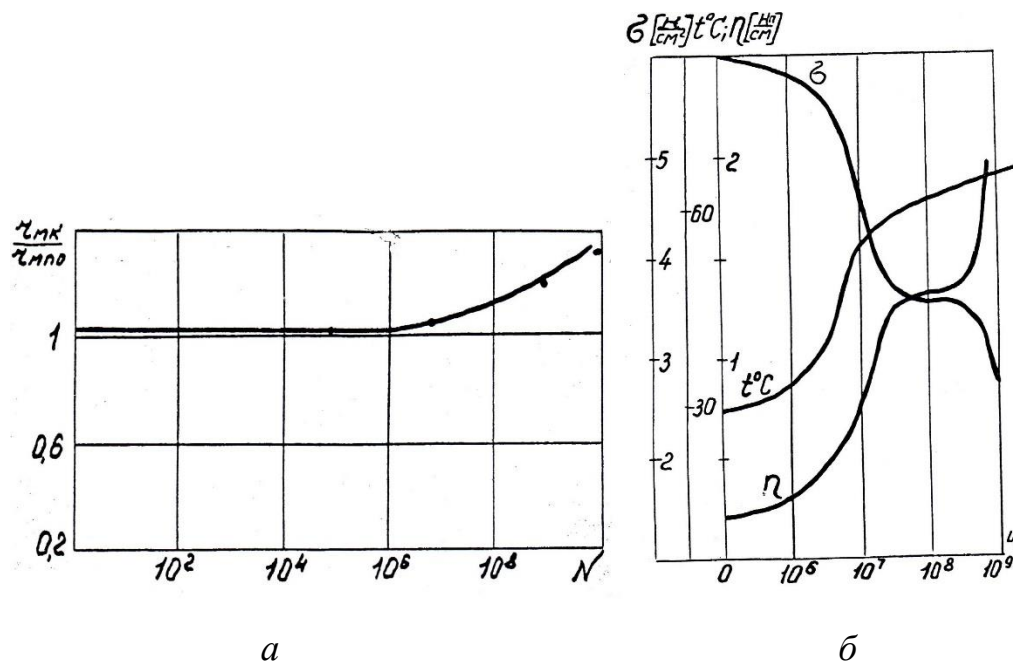


Рис. 2.11. Зміни параметрів п'єзоелементів, обумовлені процесом експлуатації

В загальному випадку процес руйнування або, точніше, накоплення пошкоджень в механічній системі залежить як від величини результуючих механічних напружень σ , що створюються діючими на неї силами, так і від міцністних характеристик системи $\sigma_{\text{гр}}$. Конкретні ж значення результуючого

напруження σ , яке діє на будь-який елемент конструкції електроакустичного приладу, залежить від умов і режиму експлуатації, типу конструкції і ролі, яку виконує в ній даний елемент.

Якщо характеристики деталей конструкцій електроакустичних приладів, виготовлених із металів і полімерних матеріалів, по суті мало чим відрізняються від характеристик деталей, які використовуються в інших галузях техніки, то специфічною особливістю п'єзокераміки є суттєва різниця між її міцністю і стиснення ($\sigma_{cm} = 35000 - 50000 \text{ Н/см}^2$) та розтягнення ($\sigma_p = 1700 - 3000 \text{ Н/см}^2$), обумовлена мікроструктурою п'єзокераміки.

В загальному випадку на елементи вузла механічної міцності можуть діяти сили, які обумовлені наявністю зовнішнього статичного тиску $p_{гс}$ та тиску у фронтах ударних хвиль p_y , а також електричних збуджуючих напружень U і температурних напружень, що викликані різницею температурних коефіцієнтів розширення матеріалів [3, 4, 6, 81, 83].

Робочі зовнішні тиски, які діють конструкції електроакустичних приладів, що працюють в рідині, в процесі їх експлуатації, постійно знаходяться в межах від 1 атм до 600 атм в залежності від призначення електроакустичної апаратури. В таблиці 2.2 наведені співвідношення для визначення механічних напружень $\sigma_{гс}$, що створюються зовнішнім тиском в різних елементах конструкцій електроакустичних приладів, де r_3 – зовнішній радіус, l – довжина, d і $2d$ – товщина активних елементів, що використовують відповідно радіальні і згинні форми коливань.

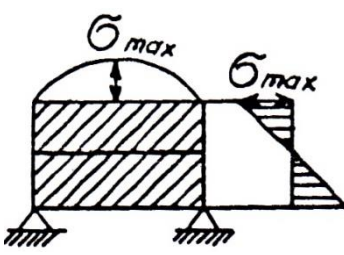
Очевидно, що результатом дії ударної хвилі на конструкції електроакустичних приладів, які є в загальному випадку багаторезонансними коливальними системами, буде достатньо складний перехідний процес, пов'язаний із збудженням багатьох форм поздовжніх і поперечних коливань елементів приладів. В результаті досліджень встановлено наступне.

При дії ударних хвиль на конструкції низькодобротних неекраниваних циліндричних і пластинчатих приладів силових і компенсованих типів в них створюється напружений стан, подібний з обтисненням постійним тиском. При цьому величина стискуючого напруження може бути визначена із співвідношення $\sigma_y = K_d A p_y$, де K_d – коефіцієнт динамічності, значення якого знаходяться для різних конструкцій в межах 1,2 – 1,5; A – коефіцієнт наведений в табл. 2.2.

В екраниваних силових і компенсованих конструкціях циліндричних приладів внаслідок неоднорідності граничних умов надто інтенсивно збуджуються нижні форми поперечних згинних коливань елементів $\sigma_y = \sigma_0 \cos i\varphi$, $i = 1, 2, 3, \dots$. При цьому амплітудні значення напружень в точках максимумів коливань можуть досягати величин до $\sigma_y = 2500 - 3000$ Н/см² (при однократній дії ударної хвилі з амплітудою $p_y = 4,9 \cdot 10^2$ Н/см² протягом 40 мс) [3, 4, 6, 81, 83].

В розвантажених конструкціях стержньових перетворювачів збуджуються поздовжні і поперечні форми резонансних коливань активних елементів. При цьому особливо великі напруження, обумовлені поперечними коливаннями, виникають в місцях переходів від п'єзокерамічної частини активного елемента до його накладок: $\sigma_y \geq 5000$ Н/см². Тому для них поряд з обтисненням повинні враховуватись і напруження $\sigma_{y,i}$, створенні поперечними коливаннями активних елементів $\sigma_y = K_d A p_y + \sum_i \sigma_{y,i}$.

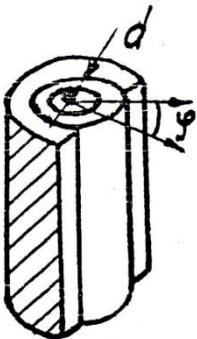
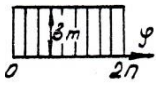
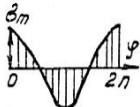
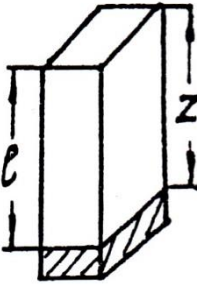
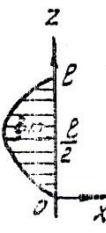
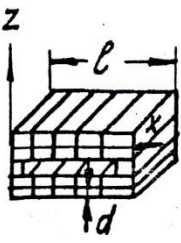
Таблиця 2.2

№ п/п	Найменування елемента	Залежність напруження від зовнішнього тиску $p_{гс}$ $\sigma_c = A p_{гс}$	Розподілення напружень по елементу	Коефіцієнт A співвідношення і межі реальних значень
I	У всіх елементах компенсованих конструкцій	$\sigma_{c,i} = p_{гс}$	рівномірне	$\frac{r_3}{d} = 8 \div 20$
II	В елементах силових і розвантажених конструкцій, що знаходяться під гідростатичним тиском			
1	Циліндр з зовнішнім радіусом r_3 і товщиною стінки d	$\sigma_c \approx \frac{r_3}{d} p_{гс}$	рівномірне	$\frac{r_3}{d} = 8 \div 15$
2	Кругла оперта пластина з радіусом r_3 і товщиною стінки $2d$	$\sigma_{c \max} = 1,25 \left(\frac{r_3}{2d} \right)^2 p_{гс}$		$\frac{r_3}{2d} = 5 \div 15$
3	Прямокутна оперта пластина довжиною l і товщиною $2d$	$\sigma_{c \max} = 0,75 \left(\frac{l}{2d} \right)^2 p_{гс}$		$\frac{l}{2d} = 5 \div 30$
4	Сфера з зовнішнім радіусом r_3 і товщиною стінки d	$\sigma_c = \frac{r_3}{2d} p_{гс}$	рівномірне	$\frac{r_3}{d} = 5 \div 10$

При роботі конструкції електроакустичного приладу в режимі випромінювання звуку електрична напруга, яка подається від генератора, збуджує коливання активного елемента та його кріплення, створюючи в них циклічні напруження $\sigma_{ц}$. Ці напруження визначаються в основному формою коливань та мірою завантаженості активного елемента. В таблиці 2.3 наведені

співвідношення, які описують розподіл циклічних напружень по об'ємам активних елементів, що використовують різні форми коливань [3, 112].

Таблиця 2.3

№ п/п	Найменування приладу	Схематичне зображення приладу	Закон розподілу динамічних напружень по об'єму активного елемента	Епюри розподілу динамічних напружень	$\sigma_0 \cdot 10^{-1}$, Н/см ²				Коефіцієнт А	Коефіцієнт а
					ТБК-3	ЦТСНВ	ЦТБС-3	ЦТС-23		
1	Циліндричний пульсуючий випромінювач силової конструкції з екраном 180°		$\sigma = \sigma_m = const$		28,6	24,1	28	26,1	1	0,8
2	Циліндричний осцилюючий випромінювач силової конструкції з екраном 180°		$\sigma = \sigma_m \cos \varphi$		57,2	48,3	56	53,2	2	
3	Циліндричний згинний випромінювач силової конструкції, який працює на другій моді коливань, з екраном 270°		$\sigma_n = \sigma_m \frac{z^2}{d} \cos 2\varphi$		80,3	67,8	78,5	74,8	2,82	0,3
4	Високодобротний стержньовий півхвильовий випромінювач з екранованою тильною стороною		$\sigma = \sigma_m \sin \frac{n\pi x}{l}$		28,6	24,1	28	26,6	1	1,0
5	Прямокутний пластинчатий випромінювач силової конструкції з опертим п'єзокерамічним активним елементом		$\sigma = \sigma_m \frac{z}{d} \sin \frac{n\pi x}{l}$		80,3	67,8	78,5	74,8	2,82	0,4

Крім того в таблиці 2.3 зазначені:

а) значення механічних напружень σ_0 , необхідних для випромінювання відповідними навантаженими коливальними системами питомих потужностей 1 Вт/см² при використанні в них різних п'єзокерамічних матеріалів;

б) коефіцієнти α , які враховують міру завантаженості електроакустичних приладів різних типів;

в) коефіцієнти $A = \sigma_{0i} / \sigma_{0ц}$, рівні відношенню σ_{0i} для даної форми коливань до $\sigma_{0ц}$ для нульової форми коливань циліндричних приладів.

Як видно з табл. 2.3, при випромінюванні $W_{\text{пит}} = 1 - 4$ Вт/см² в конструкціях електроакустичних приладів можуть розвиватись циклічні напруження, які досягають величин 240 – 3000 Н/см².

В конструкціях кріплень активних елементів найбільші циклічні напруження виникають в точках контактів кріплень з активними елементами. При $W_{\text{пит}} < 9$ Вт/см² вони не перевищують кількох одиниць Н/см².

Коефіцієнт використання конструкції електроакустичного приладу в режимі випромінювання звуку має відносно малу величину $K_g = t_g / t_{\text{екс}} < 0,01$, де t_g та $t_{\text{екс}}$ часові терміни роботи приладу відповідно в активному та експлуатаційному режимах. У зв'язку з тим, що процес накопичення ушкоджень при циклічних навантаженнях є функцією числа знакозмінних циклів «стиснення – розтягнення», дію циклічних навантажень на конструкцію електроакустичного приладу звичайно оцінюють через число циклів N . Для сучасних приладів для повного строку служби воно становить $10^9 - 10^{12}$.

Температурні механічні напруження σ_t , які виникають в елементах конструкцій електроакустичних приладів, залежать від різниці коефіцієнтів α_i

лінійних розширень спряжених матеріалів і підбором конструкційних матеріалів з близькими значеннями α_i звичайно доводяться до вельми малих величин.

Таким чином, в загальному випадку механічний напружений стан елементів конструкцій електроакустичних приладів визначається суперпозицією всіх діючих на них напружень

$$\sigma = \sigma_c + a_1\sigma_{\text{ц}} + a_2\sigma_y + a_3\sigma_T, \quad (2.11)$$

де a_i – коефіцієнти приведення відповідного напруження до статичного.

В конструктивних вузлах, які входять в функціональний вузол механічної міцності, використовується ряд зовсім різних за своїми характеристиками міцності матеріалів: п'єзокераміка (активний елемент), полімерні матеріали (електроізоляція і герметизація активного елемента, його кріплення, струмовводи та інші) і метали (елементи армування, корпус, фланці та інші). Більше того, із цих матеріалів виготовляються елементи вузлів, які мають різні конфігурації і розміри, що також може впливати на їх міцність.

П'єзокераміка є крихким матеріалом, який складається із кристалічної, аморфної і, при наявності пор, газової фаз. Механічна міцність зразків п'єзокераміки залежить від стану їх поверхні, конфігурації, розмірів, розподілу напружень і концентраторів напружень, а також характеру і тривалості прикладення навантажень. [3, 112] В конструкціях електроакустичних приладів використовуються як суцільні п'єзоелементи, так і секціоновані активні елементи, які складають із п'єзоелементів, склеєних один з одним епоксидним клеєм ДМ5-65. Відомо, що міцність клею ДМ5-65 на розтягування ($\sigma_p = 3000$ Н/см²) суттєво більша міцності п'єзокераміки на розтягування. Однак, втомлювала циклічна міцність конструкцій клеєних секціонованих п'єзоелементів, як правило, буває значно меншою, ніж міцність таких же суцільних елементів.

Причинами низької циклічної міцності конструкцій, як суцільних, так і секціонованих п'єзокерамічних активних елементів є:

- наявність п'єзокераміці мікротріщин та значна концентрація напружень біля їх вершин;
- наявність концентраторів напружень, які створюються гострими кромками п'єзоелементів, конструктивними допусками та неповною склейкою елементів;
- нижча циклічна міцність клею порівняно з міцністю п'єзокераміки;
- великі значення визначаючих розмірів (довжин гострих кромок).

Аналіз шляхів збільшення міцності конструкцій п'єзокерамічних активних елементів суцільних та секціонованих типів показує, що цього можливо досягти за рахунок таких заходів [3, 112-116]:

1. Накладенням напруження стиснення величиною, значно меншою міцності п'єзокераміки на стиснення за рахунок створення зовнішнього стиснення на конструкцію активного елемента. При цьому можливо чекати збільшення циклічної міцності зразків з п'єзокераміки, оскільки має місце суттєва різниця між міцностями п'єзокераміки на розтягування і стиснення. В якості зовнішнього стиснення можуть бути використані або гідростатичний тиск, або армуючі елементи.

2. Насичення склеєного активного елемента із п'єзокераміки просочувальним епоксидним компаундом Д-61.

3. Шліфування всіх поверхонь конструкцій п'єзоелементів, особливо гострих кромок.

4. Встановлення допусків на неплоскість поверхонь п'єзоелементів і несиметричність кутів при їх вершинах менших, ніж товщина сухого залишку клею.

5. Виключення з конструкцій активних елементів пазів для пелюсток і заміна пелюсткового електричного монтажу на пластинчатий.

Розглянемо детально можливі технічні шляхи реалізації армування конструкцій електроакустичних приладів різних типів. Необхідність появи в конструкціях п'єзокерамічних приладів, які працюють в рідині, вузлів армування обумовлена дією ряду чинників.

По-перше, як вже відмічалось, рідинні середовища відрізняють від газових суттєво більшим (в 4000 разів) хвильовим опором. Це обумовлює необхідність створювати в конструкціях електроакустичних приладів, які працюють в рідині, значно більші механічні напруження порівняно з приладами для роботи в газах для збудження в оточуючому просторі звукових полів з однаковими амплітудами коливань.

По-друге, п'єзокераміка, яка використовується для побудови конструкцій активних елементів електроакустичних приладів, є крихким матеріалом і має малу міцність на розтягування. Крім того, технологічні особливості виготовлення п'єзокерамічних елементів будь-якої конфігурації обумовлюють появу в них великої кількості випадкових дефектів у вигляді мікротріщин, мікропор і тому подібних, які виникають при спіканні матеріалу. Це обумовлює їх низьку динамічну міцність.

По-третє, за своїми фізичними характеристиками рідинні середовища мають значно більші, порівняно з газовими, потенційні можливості сприяти для поширення в них звукових хвиль великої інтенсивності. Але для їх утворення п'єзокерамічні прилади повинні мати відповідну динамічну міцність.

Таким чином при конструюванні п'єзокерамічних приладів повинні бути передбачені заходи, які примусово збільшують механічну міцність їх конструкцій. Ці заходи полягають у створенні в конструкціях п'єзокерамічних активних елементів електроакустичних приладів сталих стискуючих напружень шляхом підсилення або армування цих елементів більш міцними ніж п'єзокераміка матеріалами. При цьому слід пам'ятати, що напруження армування разом зі всіма іншими видами механічних напружень, які утворюються в

конструкціях приладів в процесі їх експлуатації, не повинні перевищувати межі міцності п'єзокераміки на стиснення. Це означає, що величина стискуючих напружень, які зміцнюють активний елемент, повинна бути, з одної сторони, більше амплітуди напружень робочого циклу при випромінюванні акустичної потужності, з другої сторони, не перевищувати величини допустимої міцності п'єзоелементів на стиснення.

Розглянемо кілька способів механічного зміцнення активних елементів п'єзокерамічних приладів, які дозволяли б створити в активному елементі армуючі напруження, необхідні для забезпечення потрібної механічної міцності конструкції електроакустичного приладу [3, 112, 115].

Попередньо відзначимо, що до способів армування конструкцій електроакустичних приладів висуваються наступні основні вимоги:

1. Забезпечення заданих технологічних напружень з мінімальним технологічним розкидом.
2. Досягнення постійності величини армуючих напружень під час експлуатації і зберігання.
3. Рівномірність армуючих напружень по куту і висоті активного елемента.

В конструкціях електроакустичних приладів активні елементи яких мають кругову циліндричну форму, армуючі напруження в активному елементі створюються завдяки використанню пружних оболонок, які посаджені на його зовнішню циліндричну поверхню з натягом. Можливі способи зміцнення таких активних елементів демонструє рис. 2.12, на якому зображені холодна посадка (а), армування з допомогою клинових гнучких вставок (б) та армування склониткою (в).

Одним з відомих способів зміцнення активних елементів є гаряча посадка металевого бандажа на п'єзокерамічне кільце через електроізоляційний шар. Нагрітий до 700 – 800 К металевий бандаж надягають на активний елемент, наприклад через шар гуми і швидко охолоджують. Після охолодження бандаж

зменшує свої розміри і створює в активному елементі напруження стиснення. Експериментальні дослідження активних елементів, армованих вказаним способом, виявили наявність нерівномірності механічних напружень по висоті електроакустичного приладу і значні зміни їх в часі. Так, наприклад, після закінчення 35 діб після армування стискуючі напруження в активному елементі знизились від двох до шести разів. У зв'язку з цим і виникала необхідність в удосконаленні способів армування циліндричних активних елементів. Один з нових способів зміцнення полягає в холодній посадці металевго бандажа через наперед розтягнутий шар гуми (рис. 2.12, *а*). Гумова оболонка 3 скорочується вздовж осі циліндра, заповнюючи без пустот щілину між бандажем 2 і активним елементом 1 і створюючи в останньому напруження стиснення. Поверхні деталей, які сполучуються, попередньо змащують епоксидним клеєм, який зменшує сили тертя в процесі складання, а після полімеризації забезпечує їх нероз'ємне з'єднання. На відміну від гарячої посадки бандажа через шар гуми, де не вдається створити клейове з'єднання деталей, яке сприяє збереженню армуючих напружень в часі, в запропонованому способі використання клею є технологічно зручним і раціональним [3].

Другим способом зміцнення активних елементів (рис. 2.12, *б*) є спосіб, при якому використовується металевий бандаж 3 і гнучкі вставки 2, які мають клиновидну форму вздовж твірної циліндра. При переміщенні клинів назустріч один одному збільшується діаметр активного елемента. В металевому бандажі створюються розтягуючі напруження, а в секціонованому кільці – стискуючі. Після заповнення технологічних зазорів епоксидним компаундом і його отвердіння утворюється монолітна коливальна система, яка відрізняється тим, що п'єзоелементи мають механічний контакт з бандажем через жорсткий електроізоляційний шар, наприклад, текстоліт. Останній адгезійно сполучений з бандажем і активним елементом. Даний спосіб забезпечує одержання армуючих напружень $\sigma_{арм}$ до 10^7 Па.

Широке застосування в вітчизняних і закордонних розробках конструкцій електроакустичних приладів знайшов спосіб армування склониткою (рис. 2.12, в). Армування здійснюється шляхом намотки розтягнутої склонитки на зовнішню поверхню активного елемента. Деталі секціонованого кільця 1 і 2 і склонитку 3 після складання промочують епоксидним компаундом і отверджують останній. Напруження стиснення в активному елементі визначається з урахуванням стискуваності зміцнюючих шарів і активного елемента. Армуючі шари склонитки мають відносно велику жорсткість в напрямку намотки и більшу податливість в перпендикулярному напрямі.

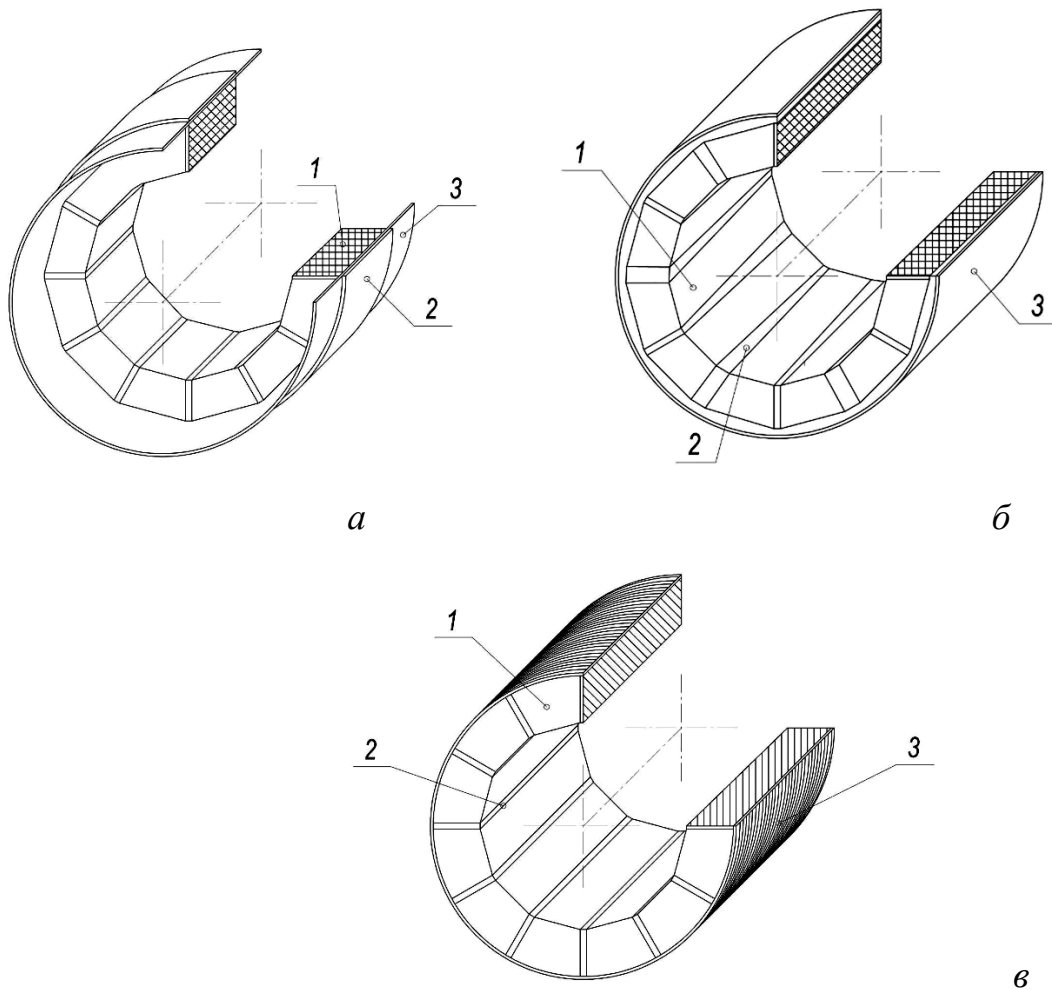


Рис. 2.12. Способи зміцнення активних елементів приладів: *а* – холодна посадка; *б* – клинові гнучкі вставки; *в* – армування склониткою.

В складених стержневих перетворювачах попередні стискуючі напруження в активних п'єзокерамічних елементах утворюються армуванням конструкцій перетворювачів з допомогою аксіально розміщених по центру активних елементів 1 стяжок 2 та гайок 3 згідно схеми, наведеної на рис. 2.13. При цьому активні елементи мають вигляд порожнистих циліндрів, крізь внутрішні порожнини яких проходять стяжки, стискуючі п'єзокерамічний блок 1, розміщений між передньою 4 та тильною 5 накладками перетворювачів. У випадку використання в перетворювачі поздовжнього п'єзоефекту конструкція активного елементу утворюється із п'єзокерамічних шайб з центральним отвором, у випадку поперечного п'єзоефекту – із суцільного порожнистого п'єзокерамічного циліндра [3, 113].

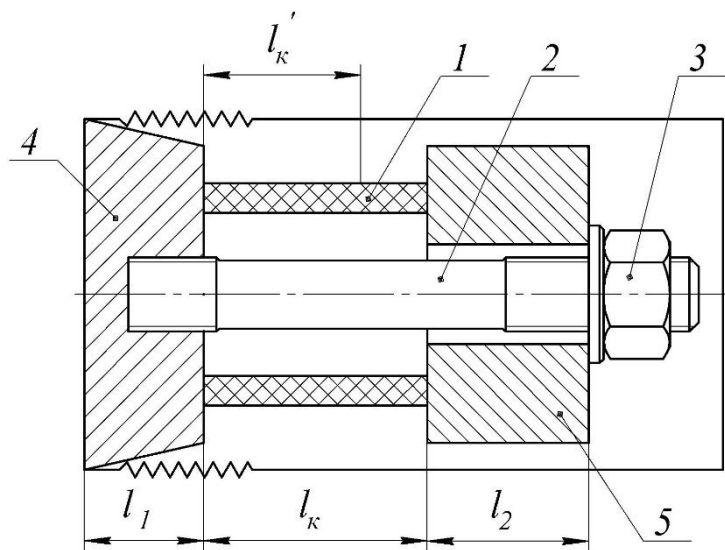


Рис. 2.13. Армування конструкцій стержневих приладів акустики

Електроакустичні прилади, які утворені із пластинчастих п'єзокерамічних перетворювачів, відрізняються від інших тим, що мають низьку динамічну механічну міцність при випромінюванні звуку. Армування активних елементів пластинчастих перетворювачів може здійснюватися за допомогою (рис. 2.14) клину (а), струни та попереднього згину пластин (б).

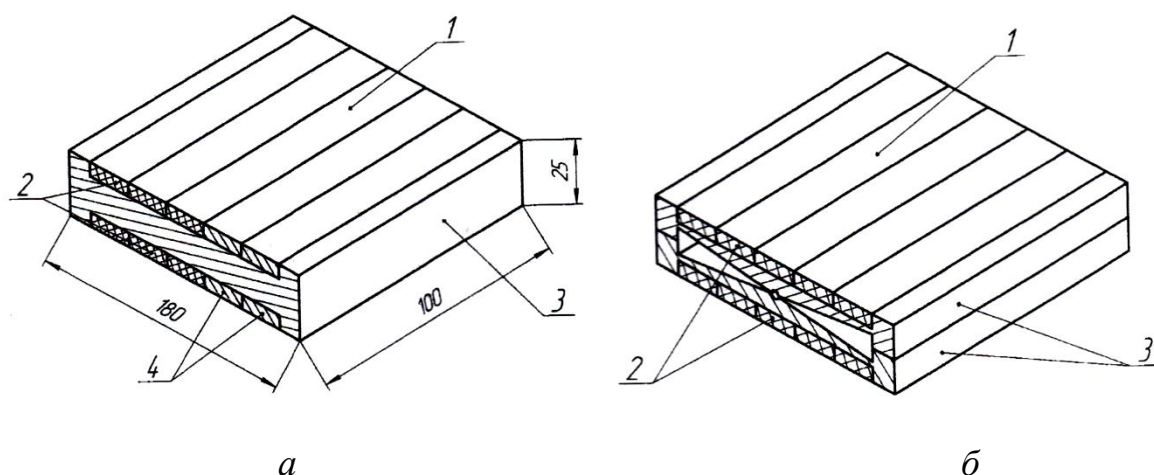


Рис. 2.14. Армування активних елементів пластинчастих приладів

При армуванні з допомогою клину (рис. 2.14, *a*) спочатку із окремих призм 1 склеюють дві п'єзокерамічні пластини 2, виготовляють металеву основу 3, яка має по довжині форму двотавра, і металеві клини 4. Далі на основу і пластини наносять шар епоксидного клею, пластини встановлюють на основу і стикують клинами. В напруженому стані конструкція розміщується в термокамері для полімеризації клею [3].

Наявність випадкових нерівномірностей в розподілі стискуючих напружень не дозволяє отримати рівномірний розподіл стискуючих напружень по всьому об'єму активного матеріалу і є недоліком цього способу зміцнення.

Армування струною здійснюється шляхом намотування струни з натягом на пластину. Для забезпечення рівномірного натягу струни торцеві поверхні пластин, в напрямі яких діють стискуючі напруження, виконують скругленими. Кількість витків визначається з урахуванням міцності матеріалу струни.

Зміцнення активного елемента в конструкції пластинчастого перетворювача попереднім згином пластин (рис. 2.14, *б*) дозволяє одержати в пластині розподіл армуючих зусиль близьким до розподілу динамічних напружень. Пластина розбивається на дві половини, кожна з яких склеюється із

шару п'єзокераміки 2 і шару металу 3. Товщини шарів обираються такими, щоб при згині кожної половини її нейтральна площина проходила по металу. Далі обидві половини склеюються з проміжними опорами, а потім стискаються з допомогою преса назустріч одна одній. При цьому каждая половина прогинається усередину і шари активного матеріалу стискаються (армуються). Величина напружень стиснення в п'єзокераміці пропорційна прогину кожної з половин, а зазор між ними вибирається із розрахунку необхідної величини армуючих напружень. В попередньо напруженому стані обидві половини склеюються або механічно закріплюються між собою.

Полімерні матеріали, як вже вказувалося, широко використовуються для задач герметизації (гуми, поліуретани, компаунди), електроізоляції (гуми, гетинакси, поліетилен), склейки, покриттів та просочування конструкції електроакустичних приладів. Як відомо, міцність полімерних матеріалів суттєво залежить від характеру напружень, температури полімерного матеріалу та агресивності середовища його збереження та експлуатації. Так, наприклад, специфічними особливостями властивостей міцності і деформації гум є:

- достатньо висока міцність та жорсткість в умовах всебічного стиснення;
- наявність високоеластичних деформацій (текучості) при плоскому напруженому стані;
- різке зниження міцності при тривалому прикладенні розтягуючого напруження;
- різке зниження міцності в середовищі озону;
- наявність температурної та циклічної деструкції.

Найбільш довговічними та стійкими в умовах експлуатації в рідині електроакустичних приладів із сучасних полімерних матеріалів є гуми С-572, НО-68-1 і компаунд УП-590-11 [1, 3, 116].

Метали мають необхідні характеристики міцності. Але при розробці конструкцій електроакустичних приладів важливе значення набуває їх корозійна

стійкість при роботі в агресивних рідинах, зокрема морській воді, в контактi з іншими матеріалами. Найбільшою стійкістю до корозії при роботі в агресивних середовищах володіють титанові сплави. Вони можуть забезпечити термін роботи конструкцій приладів в морській воді більше 10 років без прийняття спеціальних заходів по їх захисту від корозії. У випадках, коли для виготовлення деталей конструкцій електроакустичних приладів, які працюють в агресивній рідині, використовують більш дешеві сталі або алюміній, необхідно вжити заходи щодо їх корозійного захисту (протектори, обвulkanізація і т.п.).

Існуючі підходи до вибору типів і розмірів функціональних вузлів забезпечення механічної міцності при конструюванні прийомних і випромінюючих електроакустичних приладів, оснований на розрахунковому забезпеченні цього вибору, будуть наведені в наступних розділах.

2.6. Довготривала електрична міцність конструкцій електроакустичних приладів і конструкторські рішення по її забезпеченню

Крім вузла механічної міцності, тривала працездатність конструкцій електроакустичних приладів забезпечується також вузлами герметизації та електричної міцності. Звичайно розглядають сумісну роботу цих двох вузлів [3, 4, 6, 81, 83, 116].

Функціональний вузол забезпечення електричної міцності або вузол електроізоляції утворюють деталі конструкції електроакустичного приладу, які забезпечують ізоляцію його активного елемента.

Електроакустичні прилади є електричними приладами. Тому в їх конструкціях струмонесучі елементи повинні бути електроізольовані, як між собою, так і від інших елементів конструкцій. Це стосується як прийомних, так і випромінюючих приладів. При цьому, для останніх вимоги щодо забезпечення

електроізоляції є більш жорсткими, а конструкторські рішення – більш складними.

Основні типи можливих варіантів практичної реалізації електроізоляції активних елементів конструкцій електроакустичних приладів зображені на рис. 2.15, де 1 – активний елемент, 2 – електроізоляція, 3 – бандаж. У випадку герметизації активних елементів 1 шарами полімерних матеріалів 2, роль електроізоляційного матеріалу виконує сам полімерний матеріал (рис. 2.15, *а*). Якщо активний елемент 1 армовано за допомогою металу 3, то між ним і армуючим елементом вводиться шар електроізоляційного матеріалу 2 (рис. 2.15, *в*). При заповненні внутрішніх об'ємів приладів електроізоляційними рідинами роль електроізоляції і середовища, що забезпечує необхідний акустичний контакт між випромінюючими поверхнями п'єзоелементів 1 і корпусом приладу 3, можуть виконувати самі рідини (рис. 2.15, *б*). При заповненні внутрішніх об'ємів електроізоляційними газами, випромінюючі поверхні п'єзоелементів 1 електроізолюються від металевих поверхонь корпусів 3 за допомогою твердих електроізоляційних матеріалів 2 (рис. 2.15, *в*).

Таким чином, аналіз рис. 2.15 свідчить про те, що електроізоляція конструкцій електроакустичних приладів забезпечується підбандажною ізоляцією, ізоляцією від корпусу, ізоляцією монтажу і струмовводів.

Досвід експлуатації електроакустичних приладів свідчить про те, що навіть при роботі в нормальних умовах і при відносно низьких частотах на опір приладів змінному і постійному струмам суттєвий вплив має вологість і температура оточуючого середовища, а електрична міцність приладів, поряд з цими факторами, суттєво залежить від їх напруженого стану і типу пробою, який визначається цим станом. Так, в газах, при певних величинах електричної напруги, які залежать від форми електричного поля, починаються іонізаційні явища, які супроводжуються появою розряду, що тліє і переходить з ростом напруги в корону (часткові розряди) і лавиноподібні пробої. В рідинах, поряд з

іонізацією, можливі і теплові пробої. В твердих тілах можливі чисто електричні, теплові і іонізаційні (при наявності порушень суцільності) пробої через товщу метала, а також часткові розряди та перекриття по поверхні розподілу «тверде тіло – середовище», що межує з ним.

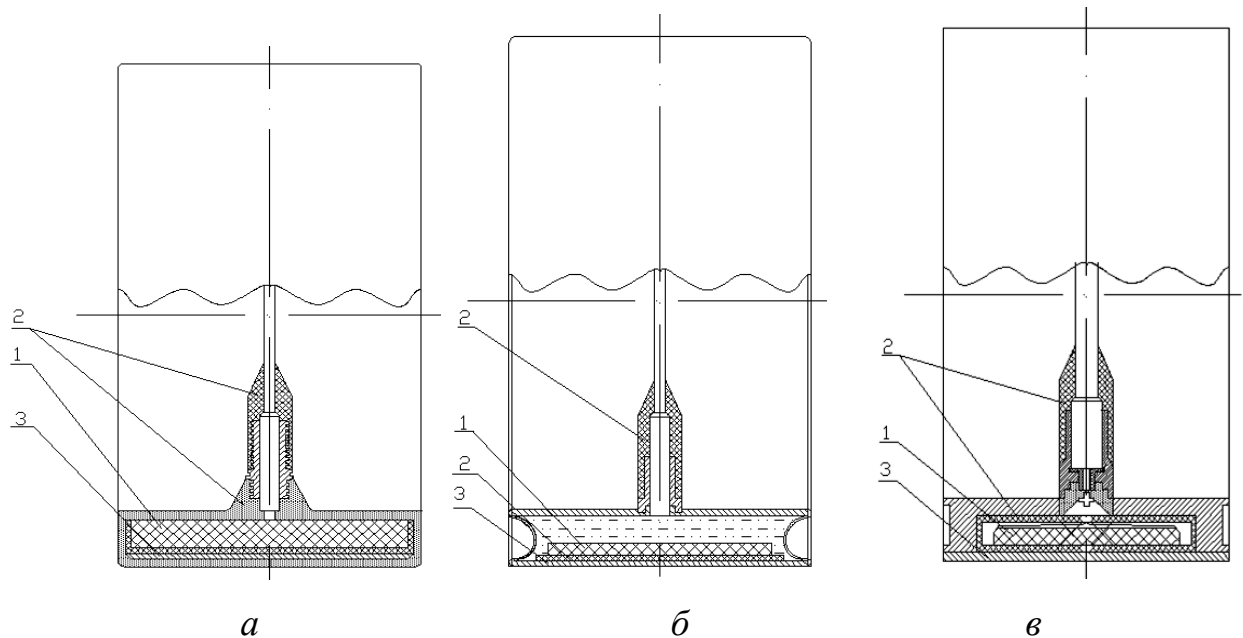


Рис. 2.15. Електроізоляція активних елементів циліндричних приладів

На рис. 2.16 зображені місця електричних пробоїв або по-іншому суттєво неоднорідні електричні поля, які мають місце в сучасних конструкціях основних типів електроакустичних приладів [3, 4, 78, 117, 118]:

- 1) поля 1 між електродами активних елементів і струмопровідними частинами корпусу приладу (бандажі, фланці, мембрани і т.п.) схожі з полем двох взаємно перпендикулярних площин, із яких одна (електрод) має товщину біля 10 – 20 мкм;
- 2) поля 2 між елементами монтажу і електродами (корпусами) схожі з полем між проводом і площиною;
- 3) поля 3 між різнополярними електродами активного елемента аналогічні полю плоского конденсатора з різко вираженим краєвим ефектом;

4) поля між елементами електромонтажу (струмовводи, проводи і т.п.) аналогічні полю двохпровідної лінії.

Найбільш неоднорідним з названих полів є поле між двома взаємно ортогональними площинами. Це поле є і найбільш поширеним типом електричного поля у випромінюючих приладах.

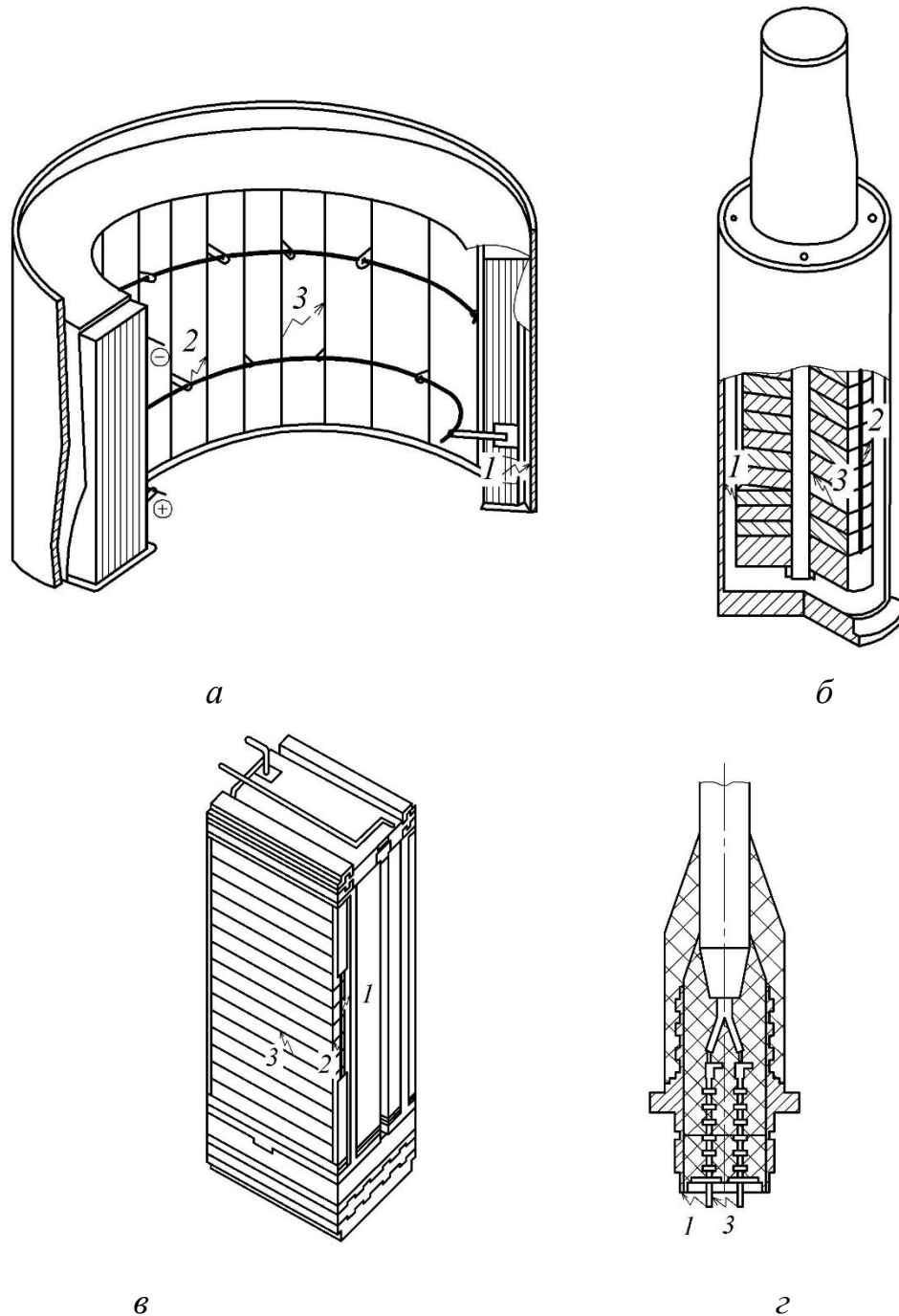


Рис. 2.16. Поширені місця електричних пробів електромеханічних приладів

З точки зору дії зовнішніх умов елементи різних типів конструкцій електроакустичних приладів знаходяться в суттєво різних умовах. Електроізоляція випромінюючих приладів герметизованих оболікаючими полімерними оболонками, в силу їх безпосереднього контакту з середовищем піддається тим же діям, що і елементи герметизації. Однак, у випадку відсутності внутрішніх об'ємів заповнених газом, в даному типі конструкцій електроакустичних приладів виключене випадання роси на поверхнях активних елементів і виникнення корони на їх струмопровідних частинах. В маслозаповнених конструкціях електроакустичних приладів виключено випадання роси, оскільки молекули рідини рівномірно розподілені по об'єму масла (оливи). В силових і розвантажених конструкціях можливе випадання роси і виникнення корони на активних елементах, а також поглинання парів рідини твердими електроізоляційними прошарками.

Наведені вище дані свідчать про те, що однією із поширених причин погіршення електричних параметрів електроакустичних приладів зволоження ізоляції їх активних елементів. Пояснюється це, як руйнуванням герметичної оболонки конструкції електроакустичного приладу, так і зволоженням електричної ізоляції активного елемента в результаті дифузії рідини крізь полімерні деталі герметизації конструкції приладу.

Основним завданням функціональних вузлів герметизації конструкцій електроакустичних приладів є забезпечення концентрації C парів рідини всередині приладів меншою гранично допустимої $C_{гр.}$: $C < C_{гр.}$. Якщо в момент виготовлення перетворювача на виробництві ця вимога виконується достатньо легко, то в процесі експлуатації її виконання суттєво ускладнюється, оскільки середовищем експлуатації є рідина, пари якої внаслідок дифузійних явищ здатні проникати у внутрішні об'єми конструкцій приладів [3, 4, 6, 81, 83, 119].

Специфіка герметизації активних елементів конструкцій електроакустичних приладів визначається наступними обставинами:

- активний елемент здійснює перетворення механічної енергії тіла, що коливається, в енергію електричного поля і навпаки в рідинах, тому при його герметизації повинна бути забезпечена можливість передачі механічної енергії коливань від активного елемента в рідину і навпаки;
- для подачі електричної напруги на електроди елемента від генератора і передачі електричної напруги з електродів елемента до підсилювача в герметизуючу оболонку має бути вмонтований електричний кабель;
- повинна бути забезпечена можливість тривалого збереження і експлуатації, в тому числі і під дією гідростатичного тиску, електроакустичних приладів, а відповідно і активних елементів у рідині;
- електроакустичні прилади зазнають дії агресивних середовищ, таких як озон, кисень, мастила і т.д.

Розглянемо деякі найпоширеніші конструкції активного елемента [3, 4, 6, 81, 83, 119] (рис. 2.17):

а) циліндричний активний елемент з електродами на внутрішній і зовнішній поверхнях циліндра (рис. 2.17, *а*). Можливе з'єднання кількох циліндрів один з одним торцями за допомогою склеювання або механічного фіксування;

б) секціонований циліндричний активний елемент, склеєний із трапецеїдальних призм, з електродами на бокових гранях (рис. 2.17, *б*). В такому секціонованому циліндрі різнойменні електроди чергуються;

в) активний елемент у вигляді круглої або квадратної пластини (рис. 2.17, *в*);

г) стержневий секціонований активний елемент, склеєний із круглих, кільцевих або прямокутних пластин (рис. 2.17, *г, д, е*);

д) пластинчатий секціонований активний елемент склеюється із прямокутних призм з електродами на бокових гранях (рис. 2.17, є).

На рис. 2.17 електроди позначені цифрою 1.

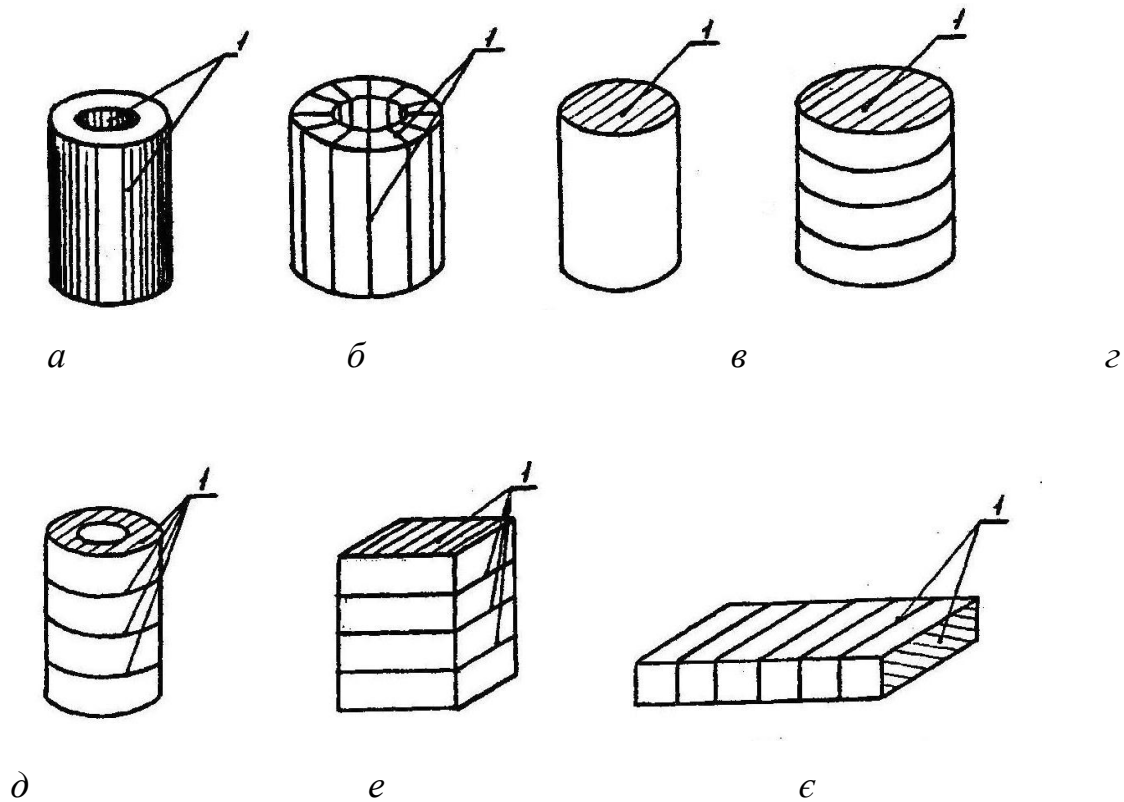


Рис. 2.17. Типові конструкції активного елемента

На основі розгляду специфіки герметизації активних елементів і їх найбільш поширених конструкцій стає можливим визначити наступні три основні схеми герметизації (рис. 2.18):

1. Активний елемент по всій поверхні контактує з рідиною через твердий матеріал, який утворює герметизуючу оболонку (рис. 2.18, а);
2. Робоча поверхня активного елемента має акустичний контакт з рідиною через шар твердого матеріалу, який є робочою частиною герметизуючої оболонки. Решта поверхні елемента контактує з повітряним об'ємом, відокремленим від рідини герметизуючою оболонкою (рис. 2.18, б);

3. Активний елемент розміщений в електроізолюючій оболонці. Акустичний контакт активного елемента з рідиною здійснюється через шар рідини і оболонку або безпосередньо через оболонку (рис. 2.18, в)

На рис. 2.18 введені такі позначення: 1 – активний елемент; 2 – герметизуюча оболонка; 3 – газ; 4 – рідина.

Ідеальними матеріалами для герметизації є метали і скло, оскільки вони непроникливі для молекул рідин. Однак використанню скла перешкоджає його крихкість – воно руйнується при деформації більше 0,1 %. Метали широко використовуються для герметизації активних елементів. Існують конструкції електроакустичних приладів, в яких тільки ввід електричного кабелю герметизовано за допомогою полімерів, а вся інша герметизуюча оболонка виконана з металу. Застосування полімерних матеріалів відкриває нові можливості в створенні конструкцій електроакустичних приладів з покращеними характеристиками завдяки меншій жорсткості таких конструкцій порівняно з металевими.

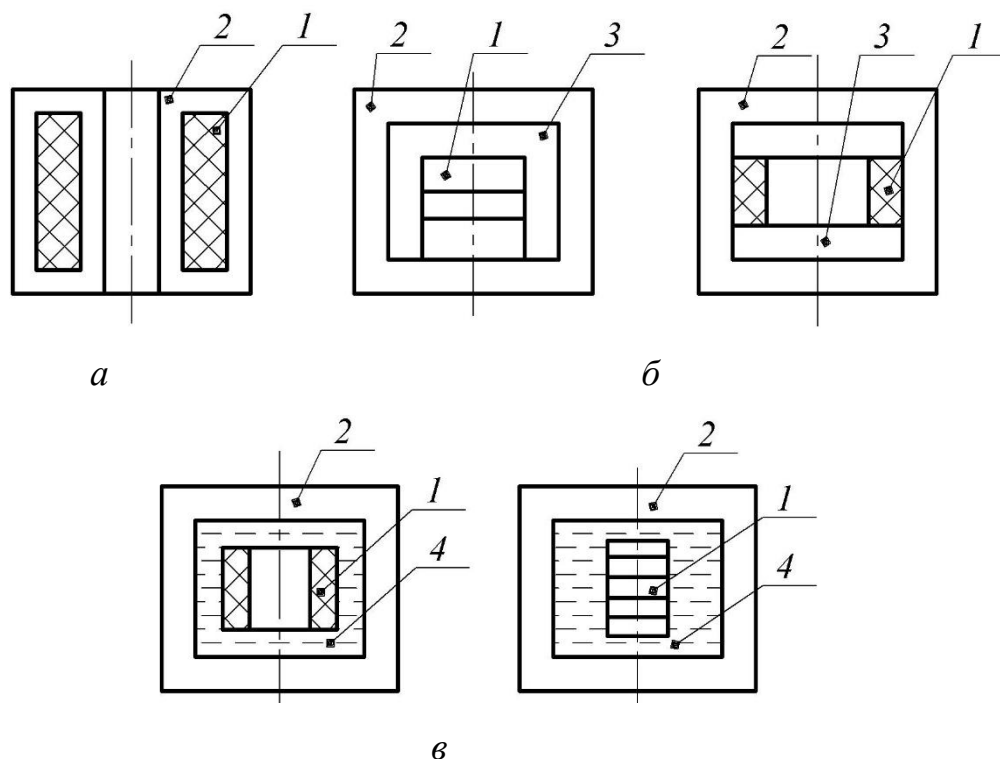


Рис. 2.18. Основні схеми герметизації електромеханічних приладів

Розглянемо способи герметизації реальних конструкцій перетворювачів з точки зору доцільності використання металевих та полімерних герметизуючих матеріалів.

Герметизуюча оболонка перетворювачів, виконана за схемою рис. 2.18, *а*, принципово може бути утворена цілком із полімерних матеріалів, оскільки під дією гідростатичного тиску в ній будуть виникати тільки всебічні стискуючі напруження. Для таких напружень міцність полімерів достатньо висока [3, 6, 117]. Міцність і стійкість герметизуючої оболонки перетворювачів, реалізованої за схемою рис. 2.18, *б*, під дією гідростатичного тиску можливо забезпечити за допомогою надміцних матеріалів, наприклад, металів або армованих склопластиків. Звичайно перевага надається металам, оскільки склопластики мають відмінні від нуля значення дифузії та вологопроникливості. Останнє ускладнює задачу створення герметичної оболонки. Для забезпечення свободи механічних коливань робочої поверхні активного елемента, «розв'язання» його країв, робоча поверхня з'єднується з рештою оболонкою через вулканізовану гуму або гнучкі металеві елементи (акустичні розв'язки).

Герметизація ділянок стиків між металевими деталями виконується зварюванням, гумовим чохлом, який надівається на циліндричну поверхню перетворювача, гумовою привулканізованою або приклеєною манжетою, а також за допомогою гумових ущільнюючих кілець.

Конструкції перетворювачів, побудованих за схемою рис. 2.18, *в*, при малому об'ємі рідини та випромінюванні активним елементом крізь твердий матеріал практично мало відрізняються від перетворювачів, побудованих за схемою *б* в сенсі вибору герметизуючих матеріалів. Тому вони мають такі ж елементи герметизації, за винятком того, що в залежності від об'єму електроізоляційної рідини передбачається нейтралізація внутрішнього надмірного тиску при підвищенні температури із-за теплового розширення рідини за допомогою гумових діафрагм.

На рис. 2.19 – 2.22 наведені варіанти практичної реалізації схем герметизації активних елементів електроакустичних приладів з використанням металевих і полімерних герметизуючих матеріалів [3].

На рис. 2.19 – 2.20 зображені герметизація відповідно стержневого і циліндричного активних елементів, виконана за схемою герметизації *a*.

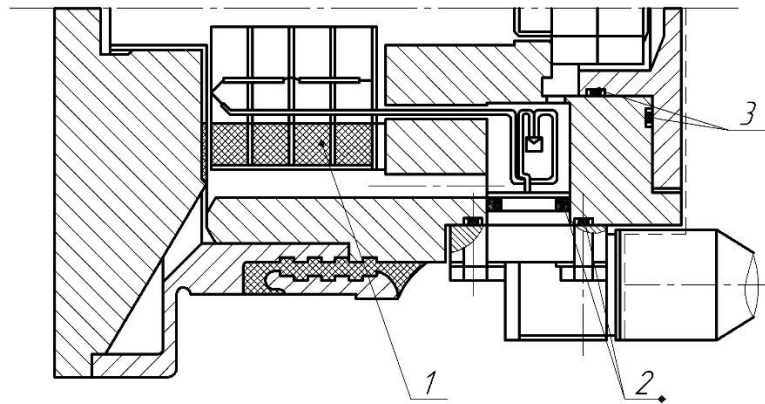


Рис. 2.19. Схема герметизації стержневого електромеханічного приладу

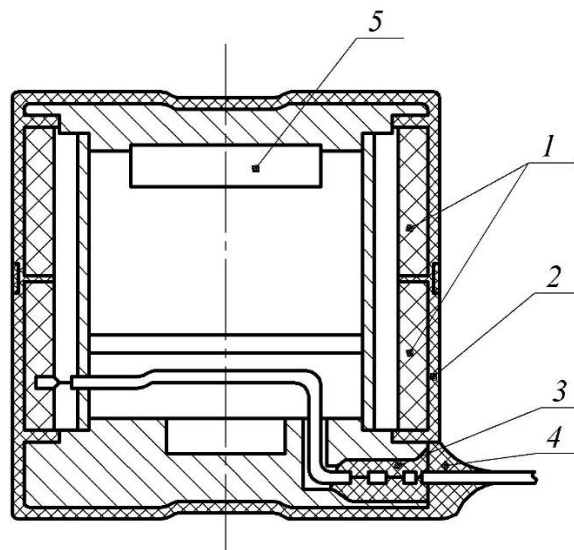


Рис. 2.20. Схема герметизації циліндричного електромеханічного приладу

На рис. 2.19 введені позначення: 1 – активний елемент; 2 – ущільнення кабелю; 3 – роз’ємне з’єднання, а на рис. 2.20: 1 – активний елемент; 2 – чохол; 3, 4 – перша і друга вулканізація кабелю відповідно; 5 – силікагель.

Рис. 2.21 демонструє конструктивну реалізацію герметизації активного елемента циліндричного електроакустичного приладу за схемою герметизації *б*, де 1 – активний елемент; 2 – металевий бандаж; 3 – акустична розв’язка; 4 – манжета; 5 – металеві фланці. Конструкція електроакустичного приладу при герметизації його активного елемента за схемою *в* (рис. 2.22) при невеликому об’ємі електроізоляційної рідини і випромінюванні звуку активним елементом 1 через твердий матеріал практично не відрізняється від електроакустичних приладів з герметизацією за схемою *б* щодо вибору герметизуючих матеріалів (2 – діафрагма компенсатора; 3 – акустична розв’язка; 4 – електроізоляційна рідина).

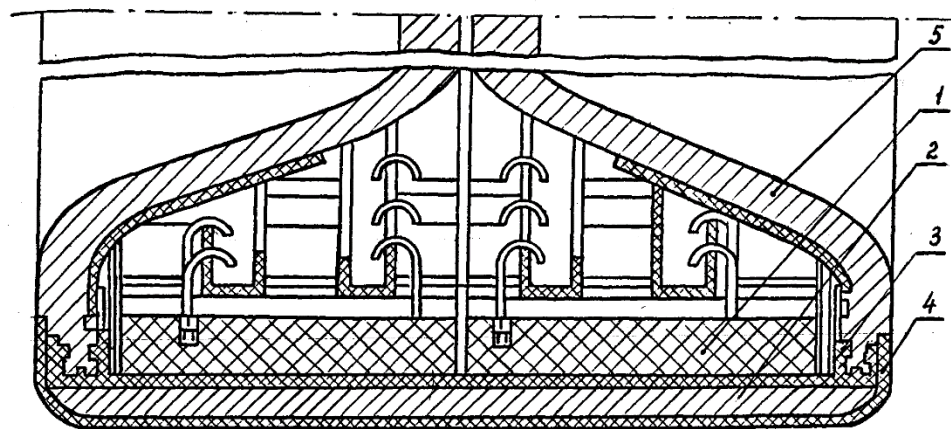


Рис. 2.21. Конструктивна реалізація схеми герметизації активного елемента циліндричного електроакустичного приладу

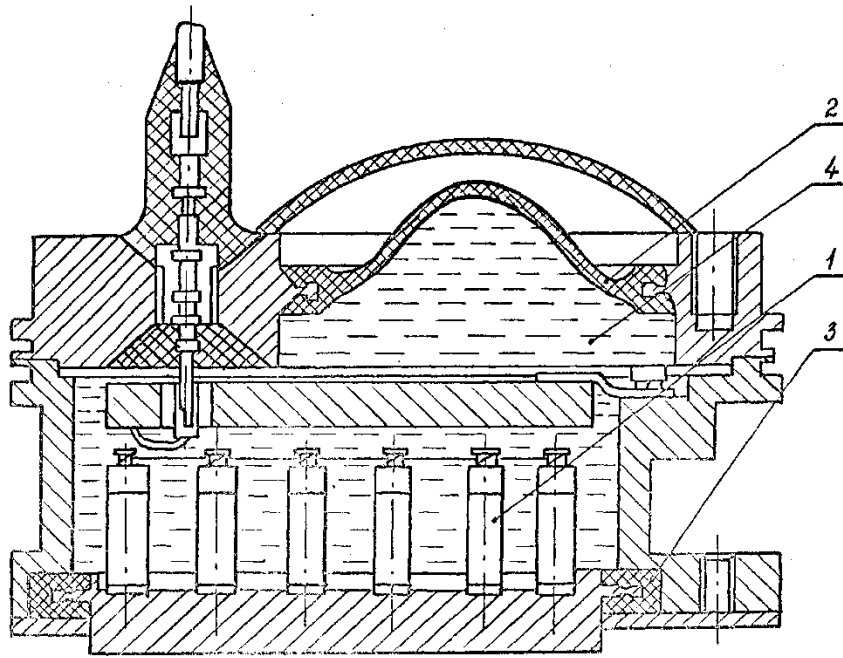


Рис. 2.22. Конструктивна реалізація герметизації електроакустичного приладу з застосуванням компенсатора тиску

Конструкції всіх перетворювачів мають ввід електричного кабелю (проводу). Він герметизується з використанням полімерних матеріалів, частіше всього – гуми [3, 81, 116]. Крім того, оболонка самих кабелів виконується із полімерів. Ввід кабелю звичайно робиться двома послідовним вулканізаціями (рис. 2.20). Перша вулканізація електроізоляційною гумою з'єднує внутрішню ізоляцію кабелю з елементами вводу, які забезпечують поздовжню механічну міцність, і ізолює жили кабелю. Друга вулканізація з'єднує шлангову оболонку кабелю з металевими деталями герметизуючої оболонки перетворювачів. В деяких конструкціях ввід кабелю виконується роз'ємним. Герметичність з'єднання забезпечується використанням гумових ущільнюючих кілець (рис. 2.19).

Аналіз можливих способів герметизації активних елементів дозволяє виділити конструктивні вузли перетворювача, в яких використання полімерних

матеріалів найбільш вірогідно. До них відносяться: герметизуючи оболонка; герметизація місць стиків металевих деталей (чохол, манжета, ущільнюючі кільця, акустичні розв'язки); ввід кабелю; діафрагма компенсатора.

Полімерні матеріали більше за інші піддаються дії факторів зовнішнього середовища. Тому їх використання повинно здійснюватись з урахуванням агресивних чинників цього середовища, до яких відносяться озон, кисень, ультрафіолетова та інфрачервона частини сонячного випромінювання, відносна вологість та рідина, а також агресивна дія морської води.

Контакт полімерів з озоном та киснем обумовлює дифузію їх молекул в полімер та проходження окислювальних реакцій, проявом яких є розрив передусім кратних зв'язків в лінійних ланцюгах макромолекул полімерів. Ультрафіолетове випромінювання в залежності від його інтенсивності руйнує молекулярні зв'язки макромолекул, перш за все – ненасичені. Інфрачервоне випромінювання безпосередньо не порушує молекулярну структурну полімерів, але підвищує температуру деталей герметизуючої оболонки перетворювачів. Більш інтенсивний тепловий рух молекул при цьому полегшує розрив молекулярних зв'язків під дією інших факторів. Дія підвищеної відносної вологості (при зберіганні) та активність рідини (води) відносно проникнення її молекул в полімери характеризується тиском насичених парів над нею при даній температурі.

Виходячи з наведеного, вимоги до вибору герметизуючих матеріалів при розробці конструкцій електроакустичних приладів різного призначення формулюються наступним чином.

Матеріали повинні бути озоностійкими. Це означає, що при перебуванні в атмосфері з концентрацією озону в середньому 10^{-6} % на матеріалах, які знаходяться у вільному або напруженому стані, не повинні з'являтися тріщини протягом всього терміну зберігання та експлуатації. Матеріали повинні бути водостійкими. Сорбція води матеріалом не повинна викликати зміну лінійних

розмірів деталей більш, ніж 5 – 10 %. Міцність матеріалу при цьому не повинна зменшуватись більш, ніж на 30 %.

Матеріал повинен бути маслостійким. Кількість масла, що потрапила на поверхню герметизуючого матеріалу, залежить від адсорбційних властивостей масла, тобто від змочуваності матеріалу. Внаслідок цього набухання матеріалу здійснюється менш інтенсивно. Тому рахують що вимозі маслостійкості відповідають матеріали, набухання яких не перевищує 20 – 30%.

Герметизуючі матеріали повинні мати адгезію один до одного та до інших конструкційних матеріалів. При цьому місце їх з'єднання по герметичності не повинно поступатись одному із матеріалів, які з'єднуються.

Велике значення для використання матеріалу для герметизації має температура переробки матеріалу в виріб і температура кріплення його до деталей герметизуючої оболонки. Якщо матеріал спочатку перероблюється в виріб-деталь і тільки потім деталь приймає участь у складанні перетворювача, то немає ніяких обмежень по температурі переробки. Температура кріплення деталей, якщо при цьому потрібно нагрівати п'єзокераміку, не може бути більшою 70 °С для п'єзокерамік складів ТБК і 90 – 100 °С для кераміки складів ЦТС [3, 81, 112].

Морські кабелі та проводи випускаються в гумовій або поліхлорвініловій шланговій оболонці. Герметизуючі матеріали для вводу їх в конструкцію перетворювача повинні з'єднуватись з гумами та поліхлорвінілом. По діелектричним характеристикам герметизуючі матеріали вводу кабелю повинні бути не гірші ізоляційної оболонки кабелю.

Для формування акустичної розв'язки матеріали повинні бути мати адгезію до металів та малі механічні втрати. Для гум це означає використання переважно гум з твердістю по Шору 70 – 80 одиниць.

Ущільнюючі гумові кільця для рознімальних з'єднань виготовляються на основі каучуків з низькою швидкістю релаксації. Величина залишкової

деформації ущільнюючого кільця до кінця терміну служби допустима не більшою 20 %.

Призначення та умови експлуатації герметизуючих манжет та чохлів мало відрізняються. Різниця може бути в геометричній формі та способі виготовлення. Чохол – це циліндр у якого довжина більше товщини стінки. Манжета може відрізнятися по формі від циліндра. Чохол виготовляється окремо. Манжета може виготовлятися окремо, а потім кріпитись по місцю при складанні або виготовляється в процесі кріплення. Матеріал для виготовлення чохлів та манжет повинен мати адгезію до металів та гум. Бажано, щоб швидкість протікання релаксаційних процесів в матеріалі була достатньо великою для зменшення напружень в деталі, які виникають при її установці.

Діафрагма компенсаторів звичайно кріпиться до металевих деталей. Матеріал діафрагми повинен дозволяти це зробити. Діафрагма експлуатується в контакті з електроізоляційною рідиною. При цьому набухання допустиме в межах 10 %, а зниження міцності не більше 30 %.

Герметизуюча оболонка в самому простому випадку може бути виготовлена із одного матеріалу. В залежності від матеріалу, який використовується, можливі три способи її виготовлення:

а) оболонку із гуми можливо привулканізувати безпосередньо на активний елемент. Температура вулканізації – в залежності від складу п'єзокераміки;

б) деталі оболонки вулканізують із гуми окремо, потім наклеюють на активний елемент;

в) оболонку виготовляють із матеріалу, який ллється (поліепоксид, поліуретан і т.п.) з допомогою вакуумної заливки активного елементу і наступної полімеризації.

Вимоги до матеріалу оболонки:

– необхідність адгезії до металів і п'єзокераміки;

- діелектричні характеристики не гірше, ніж у п'єзокераміки ($\rho_V \geq 10^9$ Ом·мм і $\operatorname{tg} \delta \leq 0,01$ в діапазоні звукових частот);
- висока швидкість релаксації механічних напружень, які виникають при полімеризації (вулканізації) та при охолодженні оболонки до нормальної температури.

Дуже важливим параметром герметизуючого матеріалу є його характеристики зволоженості. Вони визначають швидкість дифузії молекул рідини через матеріал. Час проходження рідини (води) через оболонку товщиною d , пропорційний d^2/D або d/P , де D і P відповідно коефіцієнти дифузії та проникливості. Таким чином при заданому терміні роботи товщина оболонки визначається значеннями коефіцієнтів проникливості і дифузії. За своїми параметрами найбільш близькі до потрібних гуми на основі синтетичних каучуків – наїрітового, бутадієнстирольного та деяких модифікацій бутилкаучуку, а також епоксидні і поліуретанові заливальні компаунди.

Висновки до розділу 2.

Для довготривалої та ефективної роботи електроакустичних перетворювачів їх конструкції повинні бути розраховані на роботу при зовнішніх навантаженнях. Аналіз літературних даних показав, що в процесі експлуатації в рідині на конструкції ПЕП діють додаткові навантаження, небезпечними з яких є механічні, електричні та теплові навантаження.

Виявлено, що на етапі розробки конструкцій ПЕП майже відсутнє розрахункове забезпечення процесу конструювання в частині їх електричної міцності, яке дозволяло б виконувати чисельні оцінки розроблюваних варіантів конструкції приладу, зіставляти їх з вимогами щодо забезпечення електричної

міцності в умовах експлуатації ПЕП і на основі цього співставлення вибирати найбільш раціональні варіанти конструкцій.

П'єзокерамічні електроакустичні перетворювачі відносяться до тієї групи приладів, конструкції яких мають у своєму складі активні елементи, виконані з п'єзокераміки. Під час експлуатації, в режимі випромінювання звуку виділяється теплова енергія, що призводить до нагрівання всієї конструкції перетворювача. Тому однією з важливих задач, які потрібно вирішувати при конструюванні таких перетворювачів, є визначення температури розігріву їх конструкцій. Знаючи, до якої температури та за який час розігрівається конструкція ПЕП можливо передбачити негативні наслідки від теплових навантажень.

Нагрівання перетворювача призводить до зміни характеристик приладу, або виходу з ладу. Якщо неможливо зменшити виділення тепла і подальший нагрів перетворювача, то його зазвичай обмежують у режимах використання. Збільшення температури призводить до: нелінійних реакцій і зміни робочої частоти, зміни електричного опору приладу, порушення умов узгодження з електронним генератором, деполяризації та деградації, зниження електричної міцності п'єзокераміки, механічне пошкодження елементів ПЕП.

Згідно з технічними вимогами конструкція кожного електроакустичного приладу розроблюється для роботи в визначених умовах експлуатації, в яких на кожний елемент конструкції діють визначені навантаження (механічні, електричні, теплові та інші), що створюються як умовами, так і режимом експлуатації. Для забезпечення міцності конструкції електроакустичного приладу необхідно, щоб у всіх випадках робочі навантаження σ_i , які створюються всіма видами дії, не перевищували руйнівних σ_p значень: $\sigma_i \leq \sigma_p$. Більше того, для забезпечення надійності рекомендується враховувати коефіцієнт запасу міцності конструкції, який враховує накопичення ушкоджень втомлюваності, старіння конструкційних матеріалів, флуктуації навантажень та

інші. При цьому до інших відносяться такі навантаження, як, наприклад, ті, що створюються в електроакустичному приладі при роботі його в режимі випромінювання звуку.

Отже, для забезпечення тривалої ефективної роботи конструкцій перетворювачів в рідині необхідні методики розрахунків, які дозволяли б в процесі розробки конструкцій розраховувати різні варіанти конструкторських рішень і на основі цих розрахунків здійснювати вибір одного з них, який найбільш раціонально відповідає заданим технічним вимогам.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКІВ МЕХАНІЧНОЇ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ПІДВОДНИХ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ ПРИЛАДІВ

3.1. Загальні положення

Для задоволення потреб сучасних полімедійних акустичних технологій створена значна кількість електроакустичних (електромеханічних) приладів, які відрізняються способом перетворення енергії, формами коливань активних елементів і конструктивними особливостями. При цьому, саме від способу перетворення енергії залежить ефективність електромеханічного перетворення енергії. Формою коливань активного елемента в значній мірі визначаються резонансні розміри електроакустичного приладу, вид його характеристик направленості, узгодженість перетворювача з середовищем і обумовлена ними ефективність механоакустичного перетворення енергії.

Електроакустичні прилади, що використовують одні й ті ж способи перетворення енергії і форми коливань активних елементів, можуть бути реалізовані у вигляді кількох конструктивних модифікацій. При цьому від типу конструкції електроакустичного приладу і використаних в ньому матеріалів суттєвим чином залежить ефективність, надійність, масо-габаритні характеристики і вартість електроакустичних приладів. У зв'язку з тим, що поряд з активним елементом, що забезпечує власне перетворення енергії, в конструкції будь-якого електроакустичного приладу є вузли, що забезпечують виконання функцій кріплення активного елемента, а також його електроізоляції, герметизації, екранування, забезпечення механічної міцності. Типом конструкції приладу визначається і вплив конструктивних елементів, і умов експлуатації на ефективність роботи електроакустичного приладу.

Відповідно до технічного завдання кожний електроакустичний прилад проектується для роботи з певними енергетичними можливостями протягом заданого терміну у визначених умовах експлуатації. Існує ряд фізичних факторів, які обмежують ці можливості при випромінюванні звуку: внутрішні фактори – динамічна механічна міцність, електрична міцність, нагрівання (або теплова міцність), і зовнішній фактор – явище кавітації. В зв'язку з цим, на кожний з елементів конструкції електроакустичного приладу діють певні навантаження (механічні, електричні, температурні тощо).

Незалежно від типу конструкцій і форми коливань електроакустичних приладів до основних конструкційних вузлів, які визначають механічну міцність, відносять: активні елементи, їх кріплення до корпусів приладів, електричний монтаж активних елементів та корпуси електроакустичних приладів.

Це пояснюється тим, що міцність електроакустичного приладу визначається міцністю найслабкішого конструкційного вузла. Як показала практика, таким найслабкішим вузлом при механічному навантаженні електроакустичного приладу є його активний елемент із п'єзокераміки.

В процесі експлуатації конструкції електроакустичних приладів зазнають дію як статичних, так і динамічних (знакозмінних) навантажень. Статична міцність основних конструкційних вузлів та приладу в цілому характеризує їх властивість чинити опір руйнуванню через розрив матеріалу при дії сталих розтягуючих зусиль. Кількісною мірою статичної міцності є *межа міцності* – максимальне напруження розтягування $\sigma_{\text{гр}}$, яке даний конструкційний матеріал витримує. Особливість п'єзокерамічних та п'єземагнітних матеріалів полягає в тому, що їх міцність на стискування ($\sigma_{\text{ст}} = (35 - 50) \cdot 10^3 \text{ Н/см}^2$) на порядок вища міцності на розтягування ($\sigma_{\text{розт}} = (1,7 - 3) \cdot 10^3 \text{ Н/см}^2$) [3-6], що обумовлено специфікою її мікроструктури. Тому динамічні напруження, які виникають в активних елементах електроакустичних приладів, не повинні перевищувати

відповідну межу $\sigma_{гр}$. Для збільшення динамічної міцності електроакустичних приладів в їх активних елементах створюють сталі стискуючі напруження $\sigma_{арм}$, підсилюючи (армуючи) активні елементи міцнішим ніж п'єзокераміка матеріалом, наприклад металом.

Для забезпечення міцності конструкцій електроакустичних приладів необхідно, щоб у всіх випадках робочі навантаження σ_{Σ} , що створюються всіма видами впливу, не перевищували руйнівних значень $\sigma_{гр}$:

$$\sigma_{\Sigma} \leq \sigma_{гр} . \quad (3.1)$$

Більше того, для збільшення надійності рекомендується брати за основу співвідношення $\frac{\sigma_{\Sigma}}{\sigma_{гр}} < 1$. При цьому навантаження, що допускаються, звичайно

вибираються з умови $\sigma_{\Sigma доп} = \frac{\sigma_{гр}}{K_3}$, де K_3 – коефіцієнт запасу на надійність. У

випадках невиконання умови (3.1) виникає механічне руйнування перерахованих вище конструкційних вузлів, наслідком чого може бути зміна опору механічних втрат $r_{мв}$, зміна форми коливань активних елементів та їх резонансних частот ω_p , а також втрата стійкості конструкції.

Зауважимо, що зміні форми коливань та втраті стійкості конструкції електроакустичного приладу завжди передують зростання опору механічних втрат $r_{мв}$ в місцях, де починається руйнування, яке спостерігається вже на ранніх стадіях руйнування.

В загальному випадку сумарні механічні напруження, які виникають в конструкціях вузлів та електроакустичного приладу в цілому, визначаються згідно виразу

$$\sigma_{\Sigma} = a_1\sigma_{\epsilon} + a_2\sigma_N + a_3\sigma_{арм} + a_4\sigma_T + a_5\sigma_{ск} + a_6\sigma_y , \quad (3.2)$$

де $a_1, a_2, \dots, a_6$ – коефіцієнти приведення відповідних напружень до статичних; σ_z – механічні напруження, що виникають під дією зовнішнього (для рідин – гідростатичного) тиску; σ_N – механічні циклічні напруження, які виникають при коливаннях активного елемента на одній з власних форм при випромінюванні акустичної потужності; $\sigma_{арм}$ – напруження, які створюються в активному елементі при його зміцненні (армуванні); σ_T – температурні напруження, які обумовлені зміною температури електроакустичного приладу; $\sigma_{ск}$ – напруження, які створюються в конструкції електроакустичного приладу при його складанні; σ_y – механічні напруження, які виникають в конструкції при імпульсних діяннях, наприклад, вибухах.

Для обґрунтованого вибору типів конструкційних матеріалів та розмірів деталей конструкцій електроакустичних приладів необхідно знати кількісні характеристики конкретних навантажень, які діють на них. Розглянемо детальніше кожне із наведених вище навантажень.

3.2. Механічні статичні напруження, що створюються в конструкціях зовнішнім тиском

Природно, що зовнішній тиск p_z , до якого зокрема відносять і тиск в рідинах, створює в елементах конструкцій електроакустичних приладів механічні напруження σ_z , які через наявність механічної трансформації в більшості випадків значно перевищують величину зовнішнього тиску $\sigma_z \gg p_z$.

Навантаження такого типу відносяться до статичних. Величина механічних напружень σ_z , які створюються в елементах конструкцій електроакустичних приладів зовнішнім тиском p_z , визначається співвідношенням [3]:

$$\sigma_z = A_i \cdot p_z, \quad (3.3)$$

де A_i – коефіцієнт, що визначається способом закріплення та видом напруженого стану конструкції.

Для всіх елементів компенсованих конструкцій електроакустичних приладів, на які діє всебічний зовнішній (гідростатичний) тиск, $A_i = 1$, тобто механічні напруження дорівнюють величині тиску.

В силових і розвантажених конструкціях тиск трансформується в активному елементі в загальному випадку в двовісьове механічне напруження. При цьому найбільша зі складових напружень σ_z має величину значно більшу, ніж зовнішній тиск, що їх викликає. Це і відображають коефіцієнти A_i формули

(3.3). Для циліндричних електроакустичних приладів $A_i \approx \frac{r_3}{d}$ при межах реальних

значень $\frac{r_3}{d} = 8 \div 15$. Для пластинчатих електроакустичних приладів з круглими та

прямокутними біморфними пластинами $A_i = 1,25 \left(\frac{r_3}{2d} \right)^2$ та $A_i = 0,75 \left(\frac{l}{2d} \right)^2$

відповідно. При цьому, межі реальних значень становлять $\frac{r_3}{2d} = 5 \div 15$ та

$\frac{l}{2d} = 5 \div 30$. Для сферичних приладів $A_i = \frac{r_3}{2d}$ при межах реальних значень

$\frac{r_3}{d} = 5 \div 10$. І, нарешті, для стержньових електроакустичних приладів з

накладками $A_i = \frac{S_n}{S_k}$. В наведених виразах r_3, l, d – зовнішній радіус, довжина та

товщина відповідного п'єзокерамічного елемента; S_n і S_k – площі поверхонь накладки і п'єзокераміки. Зауважимо, що активні елементи електроакустичних приладів можуть бути виготовлені із п'єзокераміки різних складів, що позначається на їх характеристиках міцності.

П'єзокераміка відноситься до крихких матеріалів. Механічна міцність зразків п'єзокераміки залежить від багатьох факторів стану їх поверхні, конфігурації, розмірів, розподілу і концентрації напружень. Теоретична оцінка статичної міцності п'єзокераміки, при умові ідеального зв'язку між її складовими частками, показує, що її значення повинно складати біля $\sigma = 0,1E_{Ю} \approx 10^6$ Н/см², де $E_{Ю}$ – модуль пружності (модуль Юнга). Однак реальна міцність зразків п'єзокераміки має суттєво менші значення (табл. 3.1).

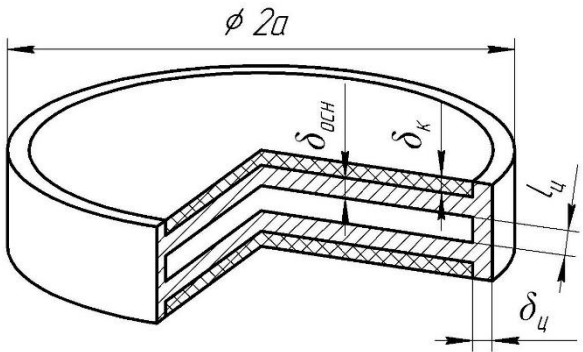
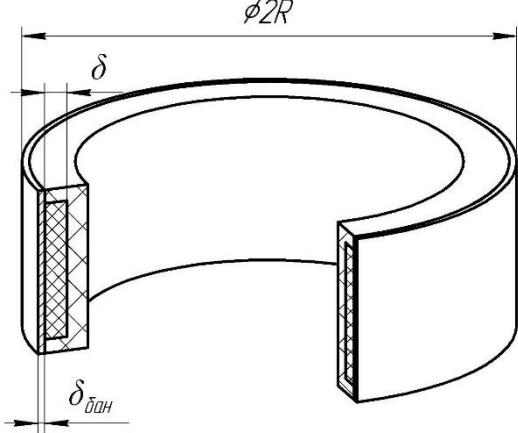
Таблиця 3.1.

Склад п'єзокераміки	Фізичні параметри		
	Межа міцності при розтягуванні $\sigma_{\text{розт}}$, Н/см ²	Межа міцності при стисненні $\sigma_{\text{ст}}$, Н/см ²	$E_{Ю}$ динамічне, 10^{-1} Н/см ²
ТБК-3	1900	35000	$1,2 \cdot 10^6$
ЦТСНВ-1	1700	35000	$0,64 \cdot 10^6$
ЦТБС-3	1900	35000	$0,86 \cdot 10^6$
ЦТС-23	1900	35000	$0,76 \cdot 10^6$

Найпростіше пояснення цього факту витікає із припущення Гриффітса [112] про наявність в матеріалі мікротріщин та значній концентрації напружень біля їх вершин. Згідно з цим допущенням, найбільше розтягуюче напруження σ_m на кінці тріщини пов'язане з середнім діючим напруженням $\bar{\sigma}$ співвідношенням $\sigma_m = 2\bar{\sigma}\sqrt{\frac{l}{r}}$, де l – половина довжини тріщини, r – радіус тріщини біля її вершини. Основними причинами появи тріщини є відмінність коефіцієнтів температурного розширення різних фаз кераміки, а також механічні та хімічні чинники (особливо на поверхні п'єзокераміки). В силу вказаних причин розподіл міцності зразків в партіях п'єзокераміки носить випадковий характер.

Наведений вище вираз (3.3) та значення коефіцієнтів A_i є орієнтовними. Статичний напружений стан активних елементів електроакустичних приладів залежить від їх конструктивного виконання. В таблиці 3.2 [3] наведені конструктивні схеми побудови електроакустичних приладів і відповідні їм формули для розрахунків механічних напружень, причиною яких є дія зовнішнього тиску.

Таблиця 3.2.

Конструктивна схема побудови електроакустичного приладу	Напруження, що виникають під дією зовнішнього тиску
	$\sigma_{\max} = -\frac{p_z a^2 E_{\text{Ю}} z_0}{8(1-\nu_{np}^2) D_{np}} \left[\chi - \frac{1}{2}(3 + \nu_{np}) \right]$
	$\sigma_z = p_z \frac{R}{\delta + \delta_{\text{бан}} \frac{E_{\text{б}}}{E_{\text{Ю}}}}$

В формулах табл. 3.2 геометричні розміри пояснюють наведені рисунки, $E_{\text{Ю}}$ – модуль пружності п'єзокераміки; $\sigma_{\max}$ – максимальні напруження в центрі

круглого пластинчастого перетворювача; $z_0 = \frac{E_{IO}\delta_k^2 + E_{осн}\delta_{осн}(2\delta_k + \delta_{осн})}{2(E_{IO}\delta_k + E_{осн}\delta_{осн})}$ –

відстань між зовнішньою і нейтральною поверхнями пластини;

$\nu_{np} = \frac{\nu E_{IO}\delta_k + \nu_{осн} E_{осн}\delta_{осн}}{2(E_{IO}\delta_k + E_{осн}\delta_{осн})}$ – приведений коефіцієнт Пуассона;

$D_{np} = \frac{1}{3(1-\nu_{np}^2)} \left\{ (E_{IO} + E_{осн}) \left[(z_0 - \delta_{осн})^3 - (z_0 - \delta_{осн} - \delta_k)^3 \right] \right\}$ – приведена

циліндрична жорсткість пластини; $E_{осн}$, $\nu_{осн}$ – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона матеріалу основи; ν – коефіцієнт Пуассона п'єзокераміки; χ – коефіцієнт пружного закладення пластини на опорному контурі. У випадку шарнірного обпирання по контуру $\chi = 0$.

Як приклад, що демонструє тонкощі впливу прийнятих при розробці конструкції електроакустичного приладу конструкційних і технологічних рішень на статичну міцність приладу під дією зовнішнього тиску, розглянемо циліндричний перетворювач силової конструкції, основні конструктивні елементи якого показані на рис. 3.1.

Циліндричні перетворювачі силової конструкції завдяки своїй специфічній формі взагалі добре протистоять зовнішньому тиску і широко використовуються, наприклад, при роботі в рідинах з гідростатичним тиском до $40 \div 60$ кг/см².

Звичайно циліндричний активний елемент (1) виконують секціонованим, склеюючи його із п'єзокерамічних призм [3]. Напрямок поляризації в п'єзокераміці (показано на рис. 3.1 темними стрілками) співпадає з напрямом найбільших (тангенційних σ_τ) механічних напружень, які виникають при коливаннях активного елемента. Секціонований активний елемент крім забезпечення максимального коефіцієнта електромеханічного перетворення володіє ще й тією перевагою, що він може бути виготовленим таких великих розмірів, які є недосяжними для технології створення суцільних циліндричних елементів.

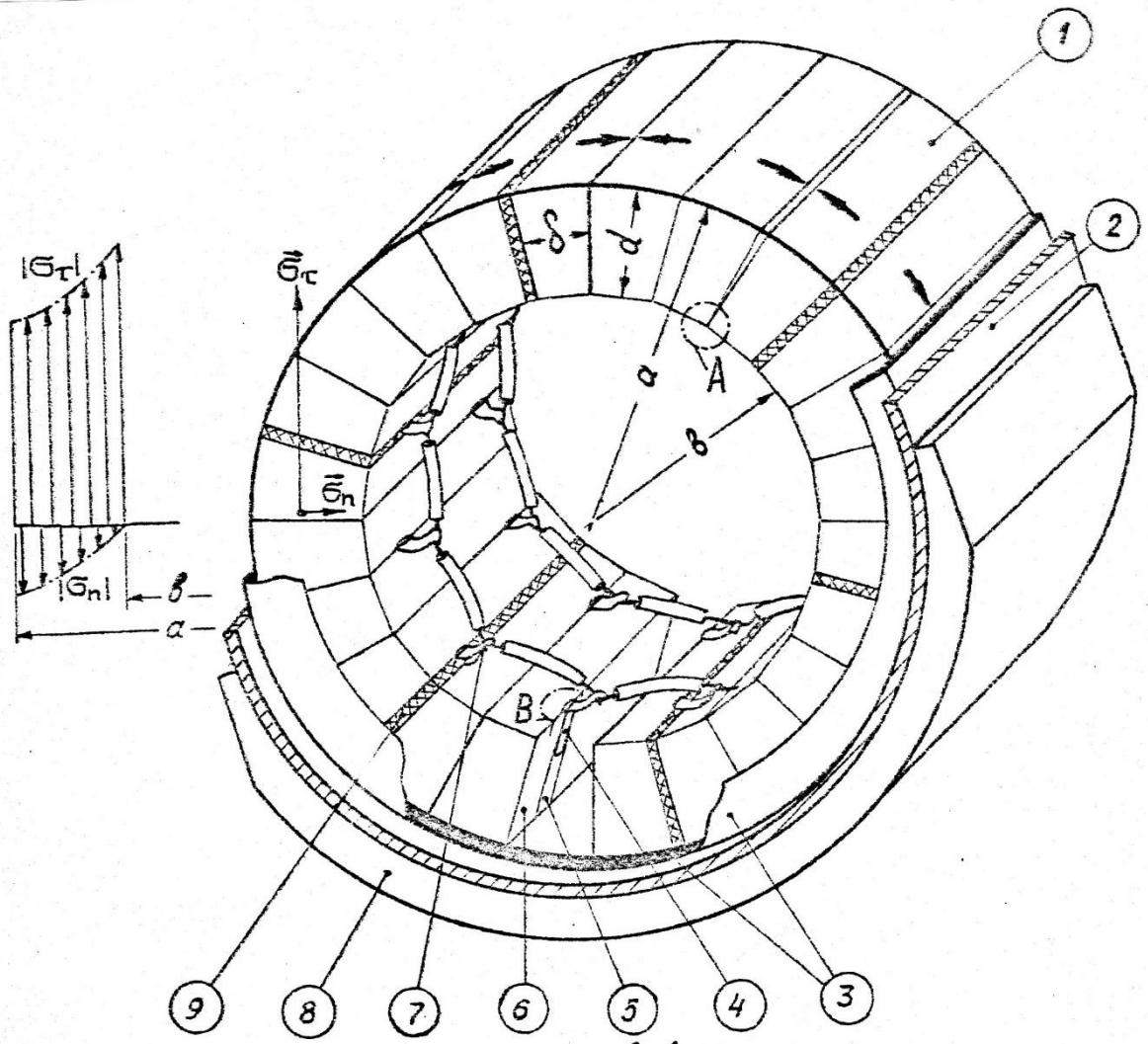


Рис. 3.1. Конструкція циліндричного приладу силового типу

Для наочності одна із призм активного елемента (нижня на рис. 3.1) зображена повністю прозорою, таким чином, що видно грань (6) сусідньої призми та монтажний пелюсток (4), який впаяний врівень в канавку (5), спеціально фрезеровану на грані і посріблену разом з нею. Пелюстки однієї полярності електрично об'єднані підвісним дротовим монтажем (7). Оскільки п'єзокераміка на розрив має малу міцність ($\approx 2000 \text{ Н/см}^2$), яка зменшується через слабку міцність клейового з'єднання призм, для збільшення динамічної міцності застосовується армування активного елемента наперед розтягнутим сталевим

бандажем (2). При цьому реалізується велика міцність п'єзокераміки на стиснення. Між бандажем і керамікою розміщено електроізоляційний шар (3) із гуми, гетинаксу, склопластику або інших полімерних матеріалів. Торці активного елемента герметично закривають кришками (фланцями) таким чином, що металеві фланці, жорстко оперті один на одного і не торкаються торців активного елемента. Весь п'єзокерамічний вузол нібито підвішений між фланцями за допомогою м'якої акустичної розв'язки. Вона призначена для того, щоб нерухомі фланці не гальмували коливального руху циліндру (1). При цьому сила зовнішнього тиску на фланці не передається торцевим поверхням активного елемента. Направлені властивості перетворювача в площині, нормальній до вісі, визначаються кутом обхвату випромінюючої поверхні акустично м'яким екраном (8) та якістю останнього.

Механічні напруження, які виникають в однорідному товстостінному циліндрі під дією рівномірного зовнішнього тиску p_z , визначаються виразами:

$$\begin{aligned}\sigma_{\tau} &= \left[1 + \left(\frac{b}{\rho} \right)^2 \right] \frac{p_z}{1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2}; \\ \sigma_n &= \left[1 - \left(\frac{b}{\rho} \right)^2 \right] \frac{p_z}{1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2},\end{aligned}\tag{3.4}$$

де a, b, ρ – відповідно зовнішній, внутрішній та поточний радіуси циліндра. Напрямок та характер розподілу по товщині σ_{τ} та σ_n вказані на рис. 3.1 для випадку $b/a = 0,7$.

Якщо тиск передається на п'єзокерамічний циліндр через металевий бандаж і гнучкий підбандажний прошарок, то для визначення механічних напружень в активному елементі доцільно застосувати вирази:

$$\sigma_{\tau}^{(\delta)} = \left[1 + \left(\frac{b}{\rho} \right)^2 \right] \frac{p_z + p^{(\delta)} \left(1 - \frac{p_z}{p_0} \right)}{1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2};$$

$$\sigma_n^{(\delta)} = \left[1 - \left(\frac{b}{\rho} \right)^2 \right] \frac{p_z + p^{(\delta)} \left(1 - \frac{p_z}{p_0} \right)}{1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2},$$
(3.5)

де $p_0 = p^{(\delta)} \left[1 + \frac{c_{\delta}}{c_{\kappa}} + c_{\delta\kappa} \right]$ – зовнішній тиск, при якому розтягнутий армуванням

бандаж прийме розміри, які він мав до армування; $p^{(\delta)}$ – тиск, що створюється армуючим бандажем; c_{δ} , c_{κ} , $c_{\delta\kappa}$ – гнучкості бандажу, кераміки та підбандажного шару, які відповідно дорівнюють:

$$c_{\delta} = \frac{r_{сер(\delta)}}{2\pi(HE_{Ю}d)_{\delta}}; \quad c_{\kappa} = \frac{r_{сер(\kappa)}}{2\pi(HE_{Ю}d)_{\kappa}}; \quad c_{\delta\kappa} = \frac{1}{2\pi(HKr_{сер})_{шару}},$$
(3.6)

де $E_{Ю}$ – модуль Юнга матеріалу; K – модуль об'ємної пружності матеріалу підбандажного шару. В реальних конструкціях $\frac{b}{a} = 0,8 \div 0,97$, тому $\sigma_z \gg \sigma_n$ і для практично значимих глибин роботи електроакустичних приладів небезпечними є лише тангенційні напруження.

Вирази (3.5) і (3.6) відносяться до випадку однорідного ізотропного циліндра. Однак на практиці не вдається до кінця використати високе допустиме значення напруження стиснення ($\approx 35000 \text{ Н/см}^2$), оскільки при виготовленні секціонованого елемента мають місце різні неоднорідності. На рис. 3.1 показані найбільш характерні з них: неспівпадіння сумарного по багатьом призмам кута шліфування (А) та технологічні пази для розміщення монтажних пелюсток (В). Такі неоднорідності створюють в кераміці ділянки з місцевою концентрацією

напружень і навіть місцевими розтягуваннями. Останні особливо суттєво знижують середнє значення гранично допустимих механічних напружень через надзвичайно низьку межу міцності п'єзокераміки на розтягування, яка посилюється ще й недостатньою міцністю клейового з'єднання призм.

Найбільш радикальним засобом вирішення проблеми усунення неоднорідностей є створення клею такого складу, модуль Юнга якого був би рівним модулю Юнга п'єзокераміки, а адгезія до кераміки була не нижчою 2000 Н/см^2 . При склеюванні призм такою масою секціоноване кільце навіть при неспівпадінні кутів шліфування окремих призм і наявності конструктивних канавок і пазів теоретично не повинно відрізнатись від суцільного кільця з точки зору розподілу механічних напружень при статичному стисненні. Поки такого клейового складу немає, потрібно виготовляти призми з мінімальними відхиленнями від номінального розміру (по куту) і застосовувати монтаж (пластинчатий або торцевий), при якому грані призм, що підлягають склеюванню, не мають пазів для монтажних пелюсток або проводів.

Найпростішим способом зменшення статичних стискуючих напружень в активному елементі під дією зовнішнього тиску є збільшення товщини кільця, як це видно з виразів (3.4) і (3.5). Однак просте збільшення товщини кільця приводить до збільшення механічної добротності, а відтак – до звуження робочої смуги частот електроакустичного приладу при випромінюванні звуку. Збільшення добротності можливо уникнути, якщо розмістити між призмами такого потовщеного активного елемента вставки (рис. 3.1) із матеріалу з модулем Юнга меншим, ніж модуль Юнга п'єзокераміки [3, 120,121].

Конструкція активного елемента з такими вставками аналогічна використанню елемента, виготовленого із активного матеріалу з усередненими параметрами:

$$E_{IO}^* = E_{IOK} \frac{E_{IOB} (V_K + V_B)}{(E_{IOB} V_K + E_{IOK} V_B)};$$

$$\rho^* = \frac{V_K \rho_K + V_B \rho_B}{V_K + V_B};$$

$$d_{ik}^* = d_{ik} \frac{V_K}{V_K + V_B},$$

де E_{IOK} , E_{IOB} , V_K , V_B , ρ_K , ρ_B – відповідно модулі Юнга, об'єми і густина п'єзокерамічного матеріалу і матеріалу вставок. При бажанні зменшити механічні напруження в п'єзокераміці від величини σ_K до величини σ_K^* так, щоб $\frac{\sigma_K^*}{\sigma_K} = \beta < 1$, і зберегти при цьому сталі значення механічної добротності Q_M та резонансної частоти ω_0 , достатньо зменшити радіус циліндра a до величини $a^* = \beta a$, не змінюючи товщини активного елемента d . Для того, щоб при зменшенні середнього радіуса резонансна частота залишилась попередньою, необхідно відповідним чином вибрати об'єм вставок та їх модуль Юнга. Однак потрібно зауважити, що зменшення механічних напружень супроводжується пропорційним зменшенням коефіцієнта електромеханічної трансформації і пов'язане з необхідністю відповідно збільшувати напруженість електричного поля при випромінюванні потрібної питомої потужності.

3.3. Механічні динамічні напруження, які виникають при коливаннях активних елементів електроакустичних приладів

Крім статичних механічних напружень, які утворюються в активних елементах електроакустичних приладів під дією зовнішнього тиску (для рідинного середовища – гідростатичного тиску) та армуючими елементами конструкцій, в цих елементах виникають також і механічні динамічні напруження. До них відносяться напруження, які створюються при роботі

електроакустичних приладів в режимі випромінювання звукової енергії при коливаннях їх активних елементів і є циклічно змінними. Величина механічних динамічних напружень, що визначає напружений стан активних елементів електроакустичних приладів, залежить від характеристик режиму випромінювання, конструктивного виконання електроакустичного приладу та його вузла армування, характеру коливань, параметрів коливальної системи та технології складання приладу.

Очевидно, що чим більша питома акустична потужність, яку випромінює електроакустичний прилад, тим більші динамічні механічні напруження створюються в його активному елементі. Продемонструємо цей зв'язок на прикладі механічної системи електроакустичного приладу, яка працює на поздовжніх коливаннях [3, 121]. Його випромінювана акустична потужність визначається формулою

$$W_a = \frac{1}{2} \alpha (\rho c)_p S v_m^2, \quad (3.7)$$

де α – безрозмірний коефіцієнт активної складової опору випромінювання приладу; $(\rho c)_p$ – питомий хвильовий опір рідини; S – площа випромінюючої поверхні; v_m – амплітуда коливальної швидкості приладу. Остання із виразу (3.7) визначається співвідношенням:

$$v_m = \left(\frac{2W_a}{\alpha (\rho c)_p S} \right)^{1/2} = \left(\frac{2W_{num}}{\alpha (\rho c)_p} \right)^{1/2}.$$

Співвідношення між амплітудами механічного напруження σ_m і коливальної швидкості v_m в плоскій хвилі, що поширюється вздовж напрямку коливань активного елементу приладу, відомо:

$$v_m = \frac{\sigma_m}{(\rho c)_\kappa}, \text{ де } (\rho c)_\kappa - \text{питомий хвильовий опір активного матеріалу, в}$$

даному випадку п'єзокераміки. Прирівнюючи два останні вирази для v_m , одержуємо:

$$\sigma_{\partial m} = \left(\frac{2W_{num} (\rho c)_\kappa^2}{\alpha (\rho c)_p} \right)^{1/2}. \quad (3.8)$$

В загальному випадку, виходячи із законна Гука і значень коливальних швидкостей точки приведення, визначених із еквівалентних електромеханічних схем випромінюючих електроакустичних приладів різного типу, можливо отримати наступні співвідношення, які пов'язують питому потужність W_{num} з максимальним динамічним напруженням $\sigma_{\partial m}$ (σ_{Na}) в цих приладах [3, 121]:

$$\sigma_{\partial m} = \sigma_{Na} = \sigma_{0i} \sqrt{W_{num}}, \quad (3.9)$$

де σ_{0i} – максимальні механічні напруження, які необхідні для випромінювання електроакустичним приладом, що працює на даній формі і коливань, питомої потужності $W_{num} = 1 \text{ Вт/см}^2$ при роботі цього приладу на резонансній частоті:

$$\sigma_{0i} = \sqrt{\frac{2(\rho c)_\kappa^2}{\alpha (\rho c)_p} B_i^2}. \quad (3.10)$$

У формулі (3.10) B_i – коефіцієнт, який визначається формою коливань. В таблиці 3.3 наведені значення коефіцієнтів B_i для різних типів електроакустичних приладів та різних складів п'єзокераміки їх активних елементів при $\alpha = 1$.

Таблиця 3.3.

Електро-акустичний прилад	B_i
Стержневий півхвильовий, $i = 1$	1
Циліндричний пульсуючий, $i = 0$	1
Циліндричний осцилюючий, $i = 1$	2
Згинний циліндричний $i = 2$	2,8
Прямокутний пластинчастий	2,83

Аналіз виразів (3.9) і (3.10) показує, що максимальні динамічні механічні напруження, які створює в конструкціях електроакустичних приладів режим випромінювання звукової енергії, залежить від випромінюваної питомої потужності, питомого хвильового опору п'єзокераміки, міри навантаженості приладу і використаної форми коливань.

Як вже відмічалось, міцність конструкцій п'єзокерамічних електроакустичних приладів при тривалій дії статичних і циклічно змінних навантажень є однією з найважливіших експлуатаційних характеристик. Наведені в попередніх розділах вирази для розрахункового забезпечення статичної і динамічної механічних міцностей конструкції електроакустичних приладів були одержані для монолітних конструкцій активних елементів. Але п'єзокераміка відноситься до крихких матеріалів з великою кількістю випадкових дефектів, які утворюються при її спіканні і є концентраторами напружень. При тривалій дії як статичних, так і динамічних циклічно змінних напружень в об'ємах п'єзокерамічних елементів накопичуються випадкові ушкодження (порожнини, тріщини, сколи, пори, конструктивні пази), які залежать від діючих в цих об'ємах напружень і випадкових значень їх меж міцності. Наведені особливості роблять неможливою оцінку міцності п'єзокерамічних активних елементів без врахування вірогідності їх руйнування,

яка допускається. Аналіз працездатності активних елементів електроакустичних приладів при наявності ушкоджень показує, що оцінка їх міцності звичайно повинна здійснюватись, виходячи із припущення однозначного зв'язку між руйнуванням активного елемента і розвитком хоча б одної наскрізної тріщини в будь-якому із п'єзоелементів, із яких він зібраний.

Співставлення розвитку наскрізної тріщини з руйнуванням якогось елементарного об'єму приводять при вказаному допущенні до найпростішого варіанта статичного опису процесу руйнування. Пропонується наступна розрахункова схема активного елемента. П'єзокерамічний матеріал активного елемента припускається складеним (рис.3.2) із елементарних об'ємів п'єзокераміки 1 та клейових з'єднань п'єзоелементів 2.

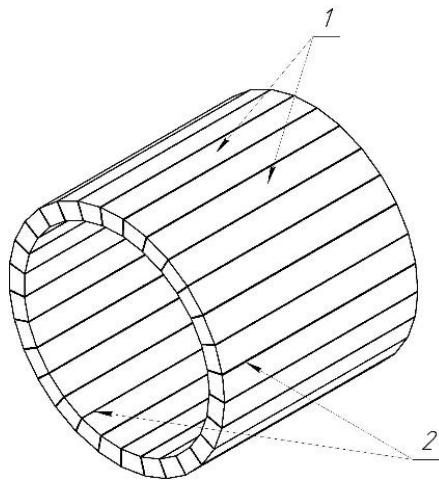


Рис. 3.2. Розрахункова схема активного елемента циліндричного приладу

Елементарні об'єми повинні бути достатньо малими для того, щоб їх напружений стан мало відрізнявся від однорідного, і в той же час були достатньо великими для того, щоб їх структура була статично однорідною, і вони володіли механічними властивостями, які мають п'єзокерамічні зразки. Характеристичні розміри активного елемента та елементарних об'ємів, які входять в нього,

визначаються сумою довжин ліній перетину поверхонь (кромek) та ліній перетину клейових швів п'єзоелементів з нешліфованими після склеювання поверхнями, на яких локалізується найбільша кількість дефектів.

Із наведеного можемо зробити висновок, що тривале прикладання до зразків п'єзокераміки як статичних, так і циклічних напружень приводить до накопичення в них напружень від утомленості, які викликають суттєве зниження міцності. При цьому експериментально визначені залежності міцності п'єзоелементів від часу знаходження їх під дією статичних і циклічних напружень апроксимуються відповідно співвідношеннями:

$$\bar{\sigma}_{ст,міцн}(t) = \frac{\bar{\sigma}_{0ст}}{\left(\frac{t}{t_0}\right)^{1/m}}; \quad \bar{\sigma}_{ц,міцн}(N) = \frac{\bar{\sigma}_{0ц}}{\left(\frac{N}{N_0}\right)^{1/m}}, \quad (3.11)$$

де $\bar{\sigma}_{0ст}$ і $\bar{\sigma}_{0ц}$ – значення статичної і циклічної міцностей, які відповідають інтервалу часу знаходження зразка під напруженням від $t = 0$ до $t = t_0$; N і N_0 – відповідні значення чисел знакозмінних циклів напруження; m – показник кривої втомленості. Зокрема, для п'єзоелементів із п'єзокераміки складу ТБК-3 $m = 7,5 \div 15$.

Характерні криві, які описують зниження статичної міцності на стиснення $\sigma_{ст}$ (крива 1) та розтягування σ_p (крива 2) від тривалості t прикладення напруження і циклічної міцності $\sigma_{ц}$ (крива 3) від числа N знакозмінних циклів навантаження для суцільних п'єзокерамічних циліндрів з розмірами діаметр 50 мм, товщина 3 мм і висота 30 мм, наведені на рис. 3.3 для вірогідності безвідмовної роботи 0,95.

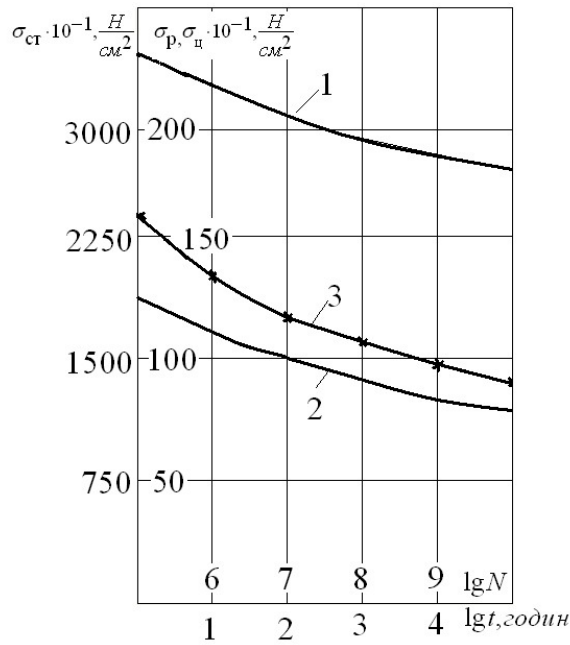


Рис. 3.3. Зниження статичної міцності приладу від часу дії впливу

Результати досліджень [3] залежності циклічної міцності σ_y суцільного (крива 1) та секціонованого (крива 2) стержнів та суцільного циліндра (крива 3) із п'єзокераміки складу ТБК-3 для вірогідності їх безвідмовної роботи 0,95 від числа знакозмінних циклів N навантажень представлені на рис 3.4.

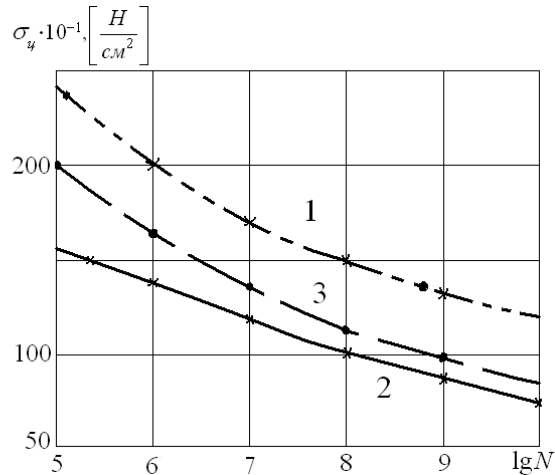


Рис. 3.4. Залежності циклічної міцності від числа знакозмінних циклів

Дослідження зразків п'єзокераміки показали, що їх циклічна міцність σ_u суттєво залежить:

1) від кристалічної структури зразків та наявності в них різних концентраторів напружень і розмірів (S) дефектів (рис 3.5): порожнин, тріщин, сколів, пор, конструктивних пазів, зокрема, пазів під пелюстковий монтаж;

2) від масштабного ефекту, який характеризується визначальним розміром

$L = 2\pi D_{\text{вн}}$, де $D_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр активного елемента (рис 3.6)

Приведена на рис. 3.5 залежність усередненої циклічної міцності $\sigma_u = f(S_{\text{def}})$ може бути наближено апроксимована співвідношенням

$$\bar{\sigma}_u = 270 \left(0,8d^2 \right)^{-\frac{1}{4,44}}, \quad (3.12)$$

де d – діаметр дефекту в мм.

Зауважимо, що міцність керамічних зразків може бути збільшена в 1,5 – 2 рази за рахунок видалення об'ємних, поверхневих та крайових дефектів. Найбільше зниження міцності елементів викликають дефекти, які розміщені на гострій кромці і поверхні п'єзоелементів.

Характер залежності циклічної міцності активних елементів електроакустичних приладів від масштабного ефекту демонструє крива рис 3.6. Її аналіз показує, що циклічна міцність п'єзоелементів суттєво зростає при зменшенні їх визначаючих розмірів – довжини гострих кромки. Зокрема, для суцільних стержньових півхвильових електроакустичних приладів з плоскими боковими гранями ефективний визначаючий розмір становить $L = 8/3 \cdot l$, де l – довжина стержня.

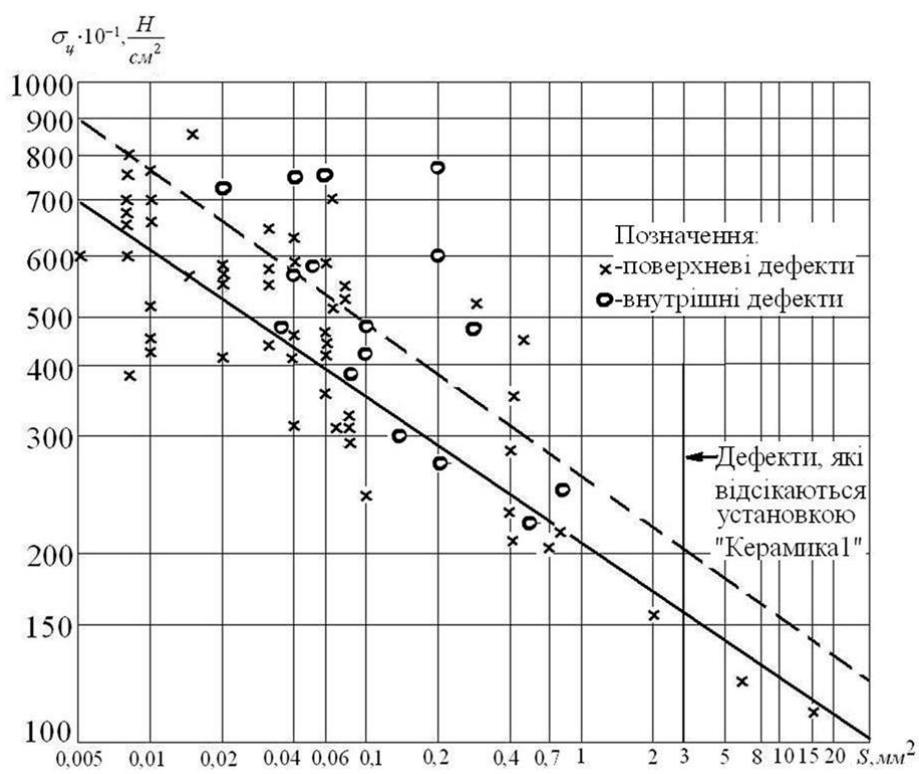


Рис. 3.5. Експериментальні дослідження циклічної міцності п'єзокерамічних елементів

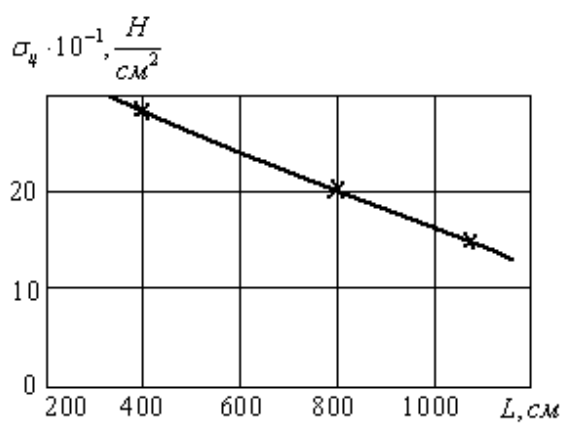


Рис. 3.6. Залежності циклічної міцності активних елементів електроакустичних приладів від масштабного ефекту

Визначимо детальніше вирази (3.9) і (3.10) в залежності від конструктивного виконання електроакустичного приладу.

Як вже відмічалось, широке застосування в коливальних системах стержневих акустичних приладів знаходять конструкції трьохсекційних складених стержнів (рис 3.7) з середньою секцією із активного матеріалу.

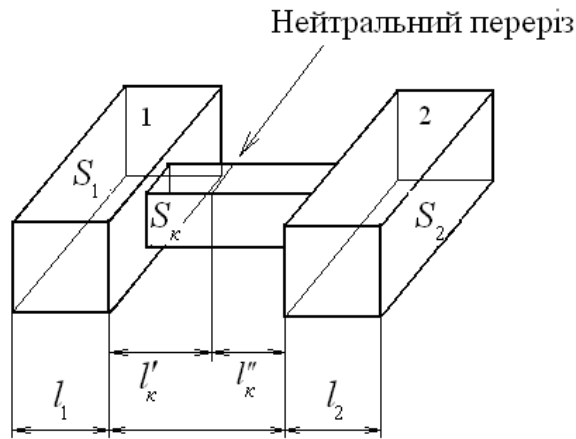


Рис 3.7. Модель трьохсекційного складеного стержня

Форма поперечного перерізу середнього стержня може бути прямокутною, квадратною, круглою, кільцевою (шайба). Форма кінцевих стержнів-накладок також може бути різною: паралелепіпед, куб, круглий диск, зрізаний конус. Оскільки стержні 1 і 2 є вільними, то складений стержень буде півхвильовим, а його ділянки відносно вузлової площини (нейтральний переріз) – чвертьхвильовими. Саме в цій площині при повздовжніх коливаннях складеного стержня механічні динамічні напруження будуть максимальними і визначатимуться виразом [3, 81]:

$$\sigma_{\partial,m} = \left[\frac{2W_{num}(\rho c)_{\kappa}^2}{\alpha(\rho c)_p} \right]^{1/2} \left[\sin\left(\frac{2\pi l'_{\kappa}}{\lambda_{\kappa}}\right) \cos\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda_1}\right) + \cos\left(\frac{2\pi l'_{\kappa}}{\lambda_{\kappa}}\right) + \cos\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda_1}\right) \frac{(\rho c)_1 S_1}{(\rho c)_{\kappa} S_{\kappa}} \right], \quad (3.13)$$

де l'_k – координата нейтрального перерізу, яку можливо знайти, виходячи з формули:

$$tg(k_k l'_k) tg(k_1 l_1) = \frac{(\rho c)_k S_k}{(\rho c)_1 S_1}$$

У випадку симетрії ($l_1 = l_2$, $S_1 = S_2$) стержневої коливальної системи ($l'_k = \frac{l_k}{2}$)

$$\sigma_{\partial, m} = \left[\frac{2W_{num} (\rho c)_k^2}{\alpha (\rho c)_p} \right]^{1/2} \left[\cos^2 \left(\frac{2\pi l_1}{\lambda_1} \right) + \left(\frac{(\rho c)_1 S_1}{(\rho c)_k S_k} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi l_1}{\lambda_1} \right) \right]. \quad (3.14)$$

Електроакустичні прилади, які утворені із пластинчастих п'єзокерамічних перетворювачів, відрізняються від інших тим, що мають низьку динамічну механічну міцність при випромінюванні звуку. Визначимо, як змінюються вирази (3.9) і (3.10) для визначення динамічної міцності конструкцій пластинчастих перетворювачів, механічна система яких виконана повністю із п'єзокераміки. Їх руйнування здійснюється в тих точках пластин, де нормальні механічні напруження досягають максимальних значень, які по своїй величині перевищують допустимі значення механічних напружень в п'єзокераміці.

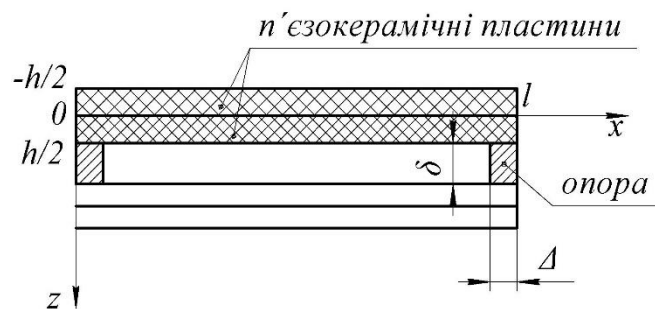


Рис. 3.8. Прямокутний перетворювач з закріпленими пластинами

Для прямокутного перетворювача при закріпленні пластини по двом протилежним ребрам (рис. 3.8) у випадку опертої пластини або пластини з малим ступенем закладення нормальні напруження досягають максимального значення

в точках з координатами $x = \frac{l}{2}$, $z = \pm \frac{h}{2}$ і при дії рівномірного навантаження становлять згідно з дослідженнями величину [3]:

$$\sigma_{\partial,m} = \frac{3,25}{\beta} \left[\frac{W_{num}(\rho c)_{\kappa}^2}{\alpha(\rho c)_p} \right]^{1/2} \frac{2B-3}{6-5B} \times \left\{ \left(\frac{31-51B+21B^2}{6-5B} \right) \left[1 + \left(\frac{1}{2} \frac{51-84B+35B^2}{31+51B+21B^2} + \frac{15}{5-4B} \right) \frac{h^2}{l^2} \right] \right\}^{1/2} \left(1 + \frac{18}{6-5B} \frac{h^2}{l^2} \right)^{-1}, \quad (3.15)$$

де β – відношення резонансних частот пластинчастого перетворювача в рідині і в повітрі; $B = \left(1 + \frac{\delta}{l} \frac{D}{D_1} \right)^{-1}$; $D_1 = \frac{E_{Ю1} \Delta^3}{12(1-\nu_1^2)}$ – згинна жорсткість опори; $E_{Ю1}$, ν_1^2 – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матеріалу опори; Δ і δ – відповідно товщина і висота опори. D – згинна жорсткість пластини.

При збільшенні степені закладення $\sigma_{\partial,m}$ зменшується, оскільки резонансна частота перетворювача збільшується [3, 16, 69] і механічні напруження в пластині перерозподіляються.

$$\text{Для опертої прямокутної пластини } B = 0 \text{ і } \sigma_{\partial,m} = \frac{4}{\beta} \left[\frac{W_{num}(\rho c)_{\kappa}^2}{\alpha(\rho c)_p} \right]^{1/2} \left(1 - \frac{h^2}{l^2} \right).$$

$$\text{Для опертої круглої пластини радіусом } a \text{ } \sigma_{\partial,m} = \frac{3,75}{\beta} \left[\frac{W_{num}(\rho c)_{\kappa}^2}{\alpha(\rho c)_p} \right]^{1/2} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{h^2}{a^2} \right).$$

Якщо прийняти, що пластинчасті перетворювачі повністю навантажені ($\alpha = 1$), їх резонансні частоти в рідині і повітрі співпадають ($\beta = 1$) і при побудові перетворювачів використана п'єзокераміка третього складу, то маємо для прямокутного перетворювача $\sigma_{\partial,m} = 80(W_{num})^{1/2}$ і для круглого $\sigma_{\partial,m} = 75(W_{num})^{1/2}$. Останні вирази свідчать про те, що при випромінюванні звуку в конструкціях

пластинчатих перетворювачів виникають значні динамічні механічні напруження.

3.4. Механічні напруження, які створюються в активних елементах електроакустичних приладів при їх зміцнюванні.

Одним з основних заходів збільшення динамічної міцності конструкцій електроакустичних приладів є створення в п'єзокерамічних елементах попередніх стискуючих (армуючих) напружень [3, 78].

У зв'язку з суттєвою різницею міцності п'єзокераміки на розтягування і стиснення збільшення циклічної міцності активних елементів електроакустичних приладів можливо досягти шляхом накладення на них напружень стиснення, значно менших міцності кераміки на стиснення.

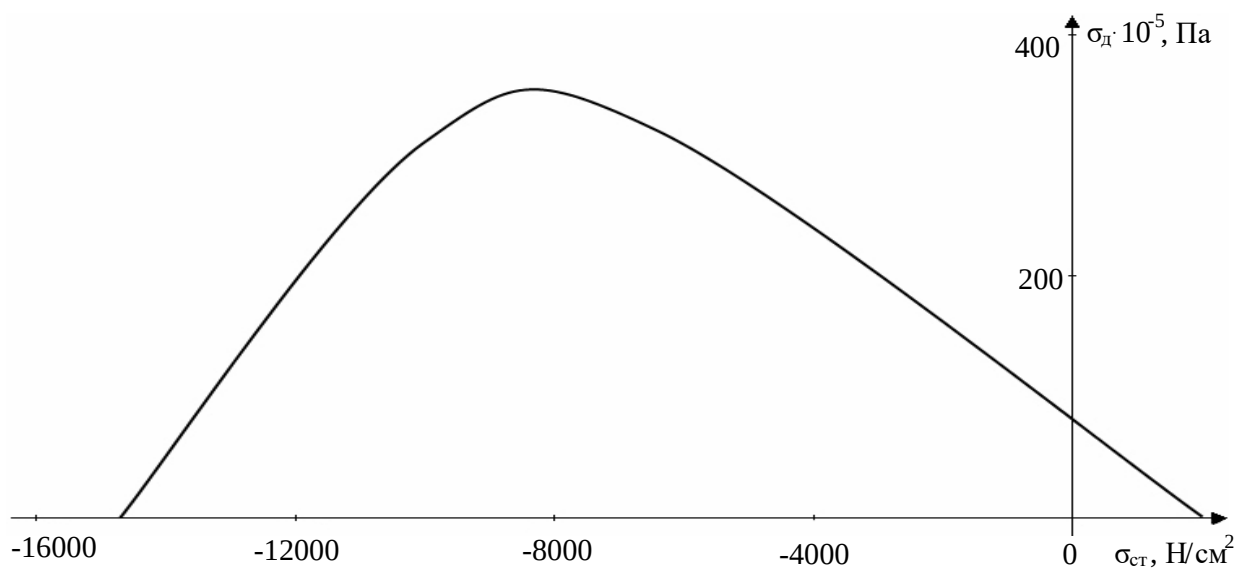


Рис. 3.9. Крива залежності динамічної міцності циліндричних активних елементів від армуючих напружень

Експериментальна крива залежності динамічної міцності σ_d активних елементів у вигляді циліндричних п'єзоелементів від величини накладених на них за рахунок армування або зовнішнього тиску рівномірно розподілених стискуючих напружень $\sigma_{ст}$ наведена на рис. 3.9.

Із кривої зміцнення рис. 3.10 видно, що при цьому може бути досягнуто збільшення міцності активних елементів більш ніж в чотири рази. Коефіцієнт зміцнення активного елемента за рахунок стиснення становить:

$$\lambda(\sigma_{стис}) = \frac{\sigma(N, P, \sigma_{стис})}{\sigma(N, P, 0)}, \quad (3.16)$$

де $\sigma_{стис}$ – стискуюче статичне напруження; $\sigma(N, P, \sigma_{стис})$ – динамічне напруження, яке створюється в активному елементі електроакустичного приладу при прикладенні до нього N циклів знакозмінного навантаження та стискуючого статичного напруження, і при цьому ймовірність неруйнування становить P . Міцність армованого суцільного п'єзоелемента становить:

$$\sigma_{арм}(N, P) \approx [\sigma_0(P) + \Delta\sigma(N, P)]\lambda(\sigma_{стис.}), \quad (3.17)$$

де $\sigma_0(P)$ – межа втомлюваності при заданому числі циклів N знакозмінного навантаження і ймовірності P неруйнування активного елемента;

$\Delta\sigma(N, P) = \frac{\bar{\sigma}_y - \sigma_0}{k}$; $\bar{\sigma}_y$ визначається формулою (3.15); k – коефіцієнт, що

враховує вплив розмірів і форми коливань реальних елементів, розмірів реальних дефектів, вимог до ймовірності безвідмовної роботи та числа циклів знакозмінного навантаження.

Таким чином, статична і циклічна міцності зразків п'єзокерамічних матеріалів суттєво залежить від наявності в зразках концентраторів напружень, величин, що визначають їх розміри, та наявності статичних напружень стиснення.

Крім суцільних активних елементів електроакустичних приладів широке

застосування знаходять секціоновані елементи, складені із п'єзоелементів, які склеюються між собою клеєм ДМ-5-65. Відомо, що міцність клею ДМ-5-65 на розтягування ($\sigma_p \approx 3000 \text{ Н/см}^2$) суттєво перебільшує міцність кераміки на розтягування. Однак циклічна міцність втомлюваності клесних секціонованих активних елементів, як правило, суттєво менша, ніж міцність рівних їм суцільних елементів. Це наглядно демонструють криві рис. 3.10 [3], які одержані при циклічному навантаженні з вірогідністю неруйнування $P = 0,95$ суцільних (крива 1), секціонованих (крива 2) і армованих (крива 3) циліндричних активних елементів діаметром 290 мм і висотою 100 мм. Видно, що міцність армованих елементів в 3 – 4 рази вища порівняно з міцністю неармованих. Фізичними причинами низької циклічної міцності секціонованих елементів є:

- а) наявність концентраторів напружень, які створюються гострими кромками п'єзоелементів, конструктивними допусками та неповною склейкою п'єзоелементів;
- б) більш низька циклічна міцність клею порівняно з міцністю п'єзокераміки;
- в) значно більші, ніж у суцільних активних елементів таких же геометричних розмірів, величини визначаючих розмірів дефектів.

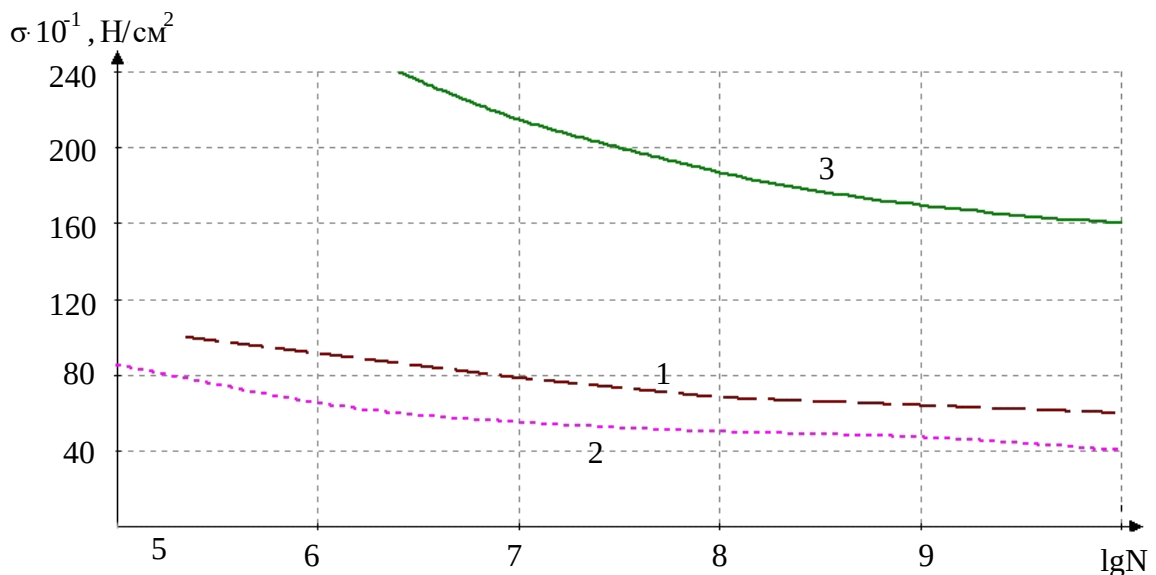


Рис. 3.10. Циклічна міцність секціонованих активних елементів

Очевидно, що реальна величина коефіцієнта зміцнення $\lambda(\sigma_{стис})$ може суттєво залежати від специфіки вибраного способу армування. Армування активних елементів циліндричних перетворювачів здійснюється або накладенням розігрітого бандажу на шар полімерного матеріалу (гетинаксу або гуми), або навивкою склонитки або металевої струни. Армування стержньових перетворювачів здійснюється накладенням на активні елементи болтових стяжок. Пластинчаті перетворювачі армують шляхом створення статичних згинаючих напружень за допомогою елементів конструкцій. В таблиці 3.4 приведені дані, які дають уявлення про параметри основних способів армування.

Залежність амплітуди циклів робочих напружень в активних елементах конструкцій електроакустичних приладів, яка допускається від початкових стискуючих напружень при будь-якій вірогідності безвідмовної роботи та будь-якому строку служби приладів та тривалості їх роботи в активному режимі може бути наведена у вигляді діаграм граничних циклів робочих напружень. Зауважимо, що звичайно такі діаграми будують у відносних напруженнях, які визначаються наступним чином:

$$\sigma_{Na \text{ відн.}} = \sigma_{Na} \frac{1}{A}; \quad \sigma_{m \text{ відн.}} = \sigma_m \frac{1}{A};$$

$$A = \left[-\ln b \left(\frac{L_0}{L(x)} \right) \right]^{1/\alpha} S_c + \left(\frac{L_0}{L(x)} \right)^{1/\alpha} S_0, \quad (3.18)$$

де $L_0, L(x), S_c, S_0$ – відповідно характеристичні розміри стандартного зразка, активного елемента та параметри розподілу меж міцності стандартних зразків при однорідному розтягуванні зі швидкістю навантаження.

Таблиця 3.4.

№ п/п	Найменування способу армування	Стискуючі напруження			
		тип активного елемента	величина $\sigma_{стис}$, $\times 10^5$ Па	розкид $\frac{3\sigma(\sigma_{стис})}{\bar{\sigma}_{стис}}$, %	релаксація, %
1.	Навивка склонитки	Циліндричний	до 500	до 20	до -20
2.	Навивка струни на гетинакс	Циліндричний	до 500	до 20	до -20
3.	Гаряче армування через гетинакс	Циліндричний	до 200	до 30	до -20
4.	Гаряче армування через гуму	Циліндричний	до 200	до 50	до -70
5.	Болтова стяжка	Стержневий	до 500	до 20	до -10
6.	Згин пластинки	Пластинчастий	до 500	до 30	до -10

Діаграми дозволяють для будь-якого активного елемента, що навантажується заданими постійними напруженнями, встановити:

- а) відносну допустиму амплітуду циклів робочих напружень;
- б) область значень відносних початкових напружень, при яких допускається відносна амплітуда циклів робочих напружень, не менших ніж та, що задається технічним завданням на конструювання електроакустичного приладу.

Зауважимо, що початкові напруження є не чим іншим як напруженнями армування. Тому обравши конструкцію армуючих деталей електроакустичного приладу та знаючи розкид початкових напружень, які визначаються технологією складання електроакустичного приладу, можливо з допомогою діаграми граничних циклів робочих напружень визначити номінальне напруження

армування, при якому допускається потрібна амплітуда циклів робочих напружень або досягається максимум допустимої амплітуди циклів робочих напружень.

Таким чином, одним з найефективніших засобів забезпечення тривалої циклічної міцності активних елементів випромінюючих електроакустичних приладів є створення в них попередніх стискуючих напружень $\sigma_m = \sigma_{арм}$ (напружень армування).

Вибір цих армуючих напружень $\sigma_{арм}$ в залежності від величини амплітуди напружень робочого циклу σ_{Na} здійснюється з урахуванням параметрів розподілу меж міцності п'єзоелементів, коефіцієнтів концентрації напружень, конструктивних особливостей активних елементів і т.п. Зв'язок між амплітудою напружень робочого циклу і інтервалом значень армуючих напружень встановлює діаграма граничних циклів навантаження п'єзоелементів, зображена на рис. 3.11

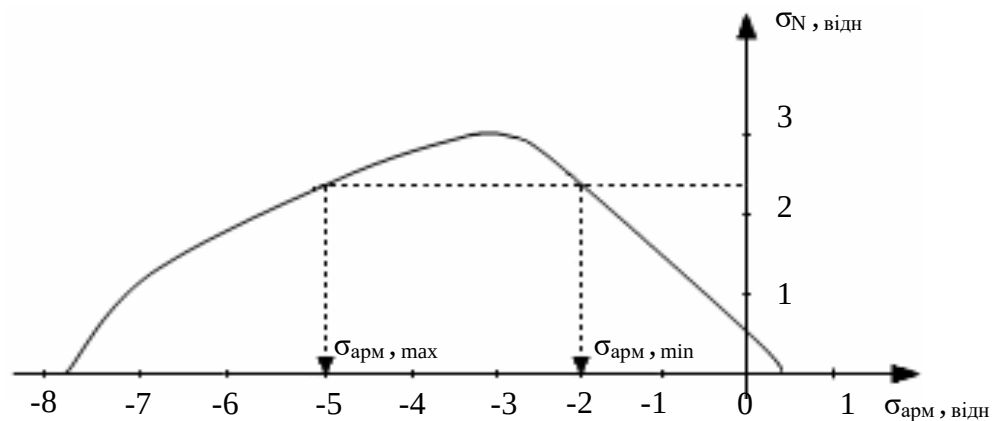


Рис. 3.11. Діаграма граничних циклів навантаження п'єзоелементів

Використання відносних величин напружень робочого циклу $\sigma_{N,відн}$ і армуючих напружень $\sigma_{арм,відн}$ дозволяє з допомогою ряду коефіцієнтів врахувати в кожному конкретному випадку особливості міцності та конструкції активного

елемента електроакустичного приладу. Розрахунки діаграми рис 3.11 граничних циклів одноосьових відносних напружень здійснювались за формулами (3.9), (3.10) і (3.19) при $K_{cm} = K_p = 1$ для активних елементів із п'єзокераміки складу ЦТС (PZT) для строку служби та зберігання електроакустичного приладу протягом 13 років і числі $N = 2 \cdot 10^9$ циклів навантаження з періодом циклів $5 \cdot 10^{-4}$ с. Формули (3.18) можуть бути записані і в наступній формі:

$$\sigma_{N \text{ відн.}} = \sigma_{Na} \frac{1}{A_1} ;$$

$$\sigma_{арм \text{ відн.}} = \sigma_{m \text{ відн.}} = \sigma_m \frac{1}{A_1}, \quad (3.19)$$

де $A = K_m^{1/\gamma} \left[(-\ln b)^{1/\alpha} S_c + S_0 \right] \frac{1}{K_{ef}}$; K_m – масштабний коефіцієнт, $K_m^{1/\gamma} = \left(\frac{4}{L} \right)^{1/2,7}$;

γ – показник степені масштабної залежності; L – характеристичний розмір, який враховує вплив гострих кромek; b – надійність (звичайно $b = 0,95$); $\alpha = 4$; S_c і S_0 – параметри розподілу меж міцності п'єзоелементів із відповідного складу п'єзокераміки; K_{ef} – ефективний коефіцієнт концентрації напружень, який враховує також вплив клейових шарів між п'єзоелементами на їх міцність при стисненні.

Оцінка стискуючих (армуючих) напружень $\sigma_{арм}$ за відомою величиною амплітуди напруження робочого циклу σ_{Na} виконується наступним чином. За формулою (3.19) визначається відносна величина $\sigma_{N \text{ відн.}}$ і відкладається на відповідній вісі діаграми рис. 3.11. Пряма, проведена паралельно вісі абсцис перетинає граничну криву діаграми в двох точках, які відповідають мінімально і максимально допустимим значенням $\sigma_{арм \text{ відн.}}$. За формулою (4.19) визначається інтервал значень армуючих напружень $\sigma_m = \sigma_{арм}$, всередині якого забезпечується тривала ($N \geq 2 \cdot 10^8$ циклів) циклічна міцність активного елемента. При цьому слід

прийняти до уваги те, що при конструюванні ряду електроакустичних приладів виникає необхідність використання армуючих елементів з відносно малою жорсткістю, які не приводили б до суттєвого збільшення резонансної частоти їх армованих активних елементів. З цією метою рекомендується величину $\sigma_{арм}$ вибирати поблизу мінімально допустимих значень напружень, але з урахуванням можливого технологічного розкиду, який реалізується при виготовленні електроакустичних приладів, та температурних напружень:

$$\sigma_{арм \max} = \sigma_{m \max} \geq \sigma_m \geq \sigma_{m \min} + \Delta\sigma + \sigma_{T \max} + \sigma_{ск \max} . \quad (3.20)$$

У виразі (3.20) $\Delta\sigma$ – технологічний розкид армуючих напружень, $\sigma_{T \max}$ – максимальна величина розтягуючих температурних напружень в активному елементі, $\sigma_{ск \max}$ – максимальна величина розтягуючих напружень при складанні активного елемента з герметизуючими елементами.

Сучасні способи механічного зміцнення активних елементів електроакустичних приладів були розглянуті в розділі 2. Визначимо підходи до розрахунку розмірів і натягів зміцнюючих елементів, що їм відповідають, які дозволяли б створити в активному елементі армуючі напруження, необхідні для забезпечення потрібної механічної міцності електроакустичного приладу.

Напруження, які створюються в активному елементі при способі армування представленому на рис. 2.12, в, визначаються за формулою:

$$\sigma_{арм} = p_k \frac{r_a}{d_a} ,$$

де r_a і d_a – середній радіус і товщина активного елемента; p_k – контактний тиск, що визначається за формулою

$$p_k = \frac{(d_2 - d_3) - (\Delta_a + \Delta_{\sigma})}{d_2} E_{\infty} . \quad (3.21)$$

У виразі (3.21) $(d_2 - d_3)$ – розмірний натяг, який є різницею товщини гумової оболонки в нерозтягнутому стані d_2 і радіального зазору d_3 між

бандажем і активним елементом; Δ_a – зміни радіального зазору за рахунок податливості активного елемента; Δ_{δ} – зміни радіального зазору за рахунок податливості бандажу; E_{∞} – рівноважний модуль пружності гуми при вісьовому стисненні.

Механічні властивості гумових деталей в залежності від умов роботи можуть суттєво змінюватись. Вплив форми гумової деталі і умов закріплення гуми на однорідній поверхні на модуль пружності матеріалу в конструкції враховується за допомогою ряду співвідношень. При наявності змазування на опорних поверхнях або незатверділого клею модуль пружності матеріалу слабо залежить від особливостей складального вузла. В свою чергу

$$\Delta_a = p_k \frac{r_a}{d_a} \frac{r_a}{E_a}; \quad (3.22)$$

$$\Delta_{\delta} = p_k \frac{r_{\delta}}{d_{\delta}} \frac{r_{\delta}}{E_{\delta}}, \quad (3.23)$$

де r_{δ} і d_{δ} – середній радіус і товщина бандажа; E_a і E_{δ} – модулі пружності активного елемента і металевго бандажа. Після підстановки формул (3.22) і (3.23) у вираз (3.21) формула для визначення контактного тиску буде мати вигляд:

$$p_k = \frac{d_z - d_3}{\frac{r_a^2}{d_a E_a} + \frac{r_{\delta}^2}{d_{\delta} E_{\delta}} + \frac{d_z}{E_{\infty}}} \quad (3.24)$$

Розглянутий варіант армування має переваги, які полягають в тому, що для його реалізації не потрібна висока точність виготовлення деталей. Стискуючі напруження, які створюються в активному елементі, однорідні по висоті і по колу та стабільні в часі. Це досягається завдяки малій і незмінній в часі жорсткості підбандажного шару, який визначається рівноважним модулем гуми при одноосьовому стисненні. Для активних елементів з відношенням $r_a/d_a \approx 15$,

гумових оболонок, які мають $E_{\infty} \approx 18 \cdot 10^5$ Па (гума С-572) при $d_a/d_z = 2$ можливо створити напруження $\sigma_{арм}$ в п'єзокерамічному кільці до $60 \cdot 10^5$ Па.

Як відмічалось, широке застосування в розробках конструкцій електроакустичних приладів знайшов спосіб армування склониткою [3, 122-124] (рис. 2.12, в). Його особливістю є анізотропія армуючого матеріалу. Анізотропію матеріалів при намотці можливо характеризувати відношенням модулів Юнга в напрямі намотки E_{θ} і в радіальному напрямі E_r з допомогою параметра $\alpha_{ск} = \sqrt{\frac{E_{\theta}}{E_r}}$. Для орієнтованих склопластиків E_r може змінюватись в межах від $20 \cdot 10^5$ Па до $800 \cdot 10^5$ Па, а E_{θ} – в межах $(0,25 \dots 0,8) \cdot 10^{11}$ Па. Тому для більшості практичних випадків значення $\alpha_{ск}$ вибирають в діапазоні від 30 до 70.

При намотці шарів склонитки з середнім радіусом $R_{ск}$ із витків, які є радіально нестикуємими, на абсолютно жорсткий активний елемент, тиск $p_{жс}$, який передається йому, становить:

$$p_{жс} = \frac{n_{ск} T_{ск}}{R_{ск}}, \quad (3.25)$$

де $n_{ск}$ – число витків склонитки; $T_{ск}$ – натяг склонитки при намотці.

При намотці шарів, які є радіально стискуєчими, тиск $p'_{жс}$ дорівнює:

$$p'_{жс} = \frac{T_{ск}}{\chi_n R_{ск}} \operatorname{arctg}[sh(h_{ск} \chi_n)] \quad (3.26)$$

У виразі (3.26) $\chi_n = \alpha_{ск} \frac{h_{ск}}{R_{ск.в}}$; $h_{ск}$ – радіальна товщина склонитки і зв'язуючого;

$R_{ск.в}$ – внутрішній радіус армуючих шарів склонитки. Зміни величини $\frac{p_{жс}}{p'_{жс}}$ в

залежності від товщини шару, що намотується, $\frac{r_{аз}}{r_{ав}}$, де $r_{аз}$ і $r_{ав}$ – зовнішній і

внутрішній радіуси шару, і значення параметру анізотропії α_{ck} наведені на рис.

3.12

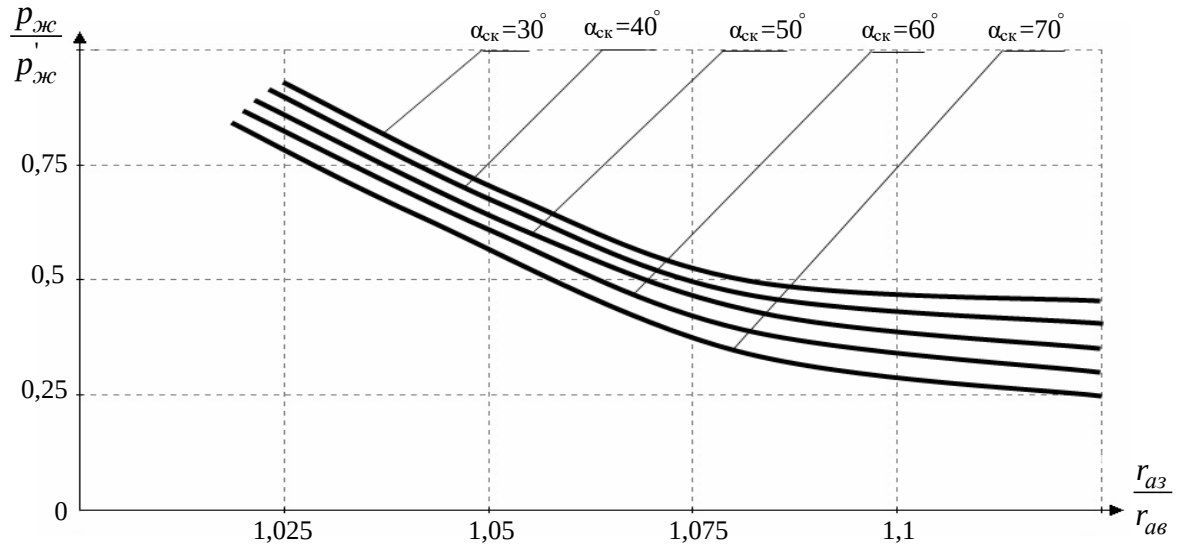


Рис. 3.12. Зміна параметрів циліндричних приладів при армуванні

Жорсткість кільця, яке армується склониткою, враховується за допомогою параметра γ_a :

$$\gamma_a = \frac{E_{ck}}{E_a} \left(\frac{r_{az}^2 + r_{av}^2}{r_{az}^2 - r_{av}^2} - \mu_a \right),$$

де E_a , μ_a – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона активного елемента.

Контактний тиск p_k , який створюється в активному елементі з урахуванням радіального стиснення армуючих шарів і податливості кільця у випадку, коли $\gamma_a < \alpha_{ck}$, визначається за формулою:

$$p_k = \frac{2p_{жс}}{\chi_n \sqrt{\alpha_{ck}^2 - \gamma_a^2}} \left[\arctg \left(\eta (1 - \chi_n)^{\alpha_{ck}} \right) - \arctg \eta \right], \quad \text{де } \eta = \frac{\alpha_{ck} + \gamma_a}{\alpha_{ck} - \gamma_a}.$$

Позитивною якістю способу армування активного елемента склониткою є одержання рівномірного розподілу армуючих напружень по куту і висоті

активного елемента.

Для оціночних розрахунків напружень армування електроакустичних приладів у вигляді кругових циліндричних перетворювачів може бути використаним вираз:

$$\sigma_{арм} = -\sigma_{\delta} \frac{\delta_{\delta}}{\delta},$$

де σ_{δ} – розтягуючі напруження в бандажі; δ_{δ}, δ – товщина бандажу і п'єзокерамічного кільця відповідно.

Як вже вказувалось, армування електроакустичних приладів у вигляді складених стержньових перетворювачів здійснюється болтовою стяжкою за схемою рис. 2.13. Напруження армування активних елементів розраховується при цьому згідно з формулою:

$$\sigma_{арм} = -\sigma_{mcm} \frac{S_{cm}}{S_{\kappa}},$$

де σ_{mcm} – розтягуючі напруження в армуючій стяжці; S_{cm}, S_{κ} – площі поперечних перерізів стяжки і керамічного стержня.

Способи армування активних елементів пластинчастих перетворювачів були розглянуті в розділі 2. При армуванні конструкції з допомогою клину (рис. 2.14, а) в напруженому стані конструкція розміщується в термокамері для полімеризації клею. Для створення армуючих напружень $\sigma_{арм} = 100 \cdot 10^5$ Па при розмірах пластин, наведених на рис. 2.14, а, на клин потрібно давити із зусиллям $(1,2...1,4) \cdot 10^4$ Н. При цьому п'єзокераміка деформується на величину

$$\Delta l = \frac{l \cdot \sigma_{арм}}{E_{Ю}} = 0,0154 \text{ мм}.$$

3.5. Практичне застосування методик розрахунків механічної міцності конструкцій електроакустичних приладів

Згідно з сучасним методом конструювання електроакустичних приладів – функціонально-вузловим методом, механічна міцність конструкцій приладів забезпечується правильним вибором параметрів всіх конструкційних вузлів, які входять в функціональний вузол механічної міцності [3-6, 124-126]. Вихідними даними для вибору механічної міцності виступають:

- величини діючих на конструкції сил та створювані ними напруження, які визначаються як умовами і режимами експлуатації, так і типом функціонального вузла забезпечення механічної міцності конструкції приладу;
- інформація про параметри міцності матеріалів і вже відомих типів функціональних вузлів забезпечення механічної міцності та їх конструктивних вузлів, яка існує на початок розробки конструкції приладу.

У зв'язку з тим, що напружені стани конструкцій прийомних і випромінювальних електроакустичних приладів суттєво відрізняється між собою, доцільно розглядати підходи до вибору типів і розмірів функціональних вузлів забезпечення механічної міцності окремо для приймачів і випромінювачів.

Розглянемо існуючі підходи, які використовуються при конструюванні прийомних електроакустичних приладів. Для кожного з типів функціональних вузлів міцності, які можуть бути використані в заданих умовах, необхідно визначити механічні напруження, які створюються у всіх їх елементах діючими на приймач змушуючими силами. Такими силами є гідроакустичний тиск p_z і тиск у фронті ударної хвилі p_y . Наближенні значення σ_c можуть бути визначені за допомогою табл. 2.2, причому ці напруження діють на приймачі протягом всього часу їх експлуатації.

Наближене значення стискуючого напруження, яке викликане взаємодією ударної хвилі з конструкцією прийомного приладу становить $\sigma_y = Ak_{\partial} p_y$. В момент приходу ударної хвилі у всіх елементах функціонального вузла міцності здійснюється складення миттєвих значень $\sigma = \sigma_c + \sigma_y$. В результаті повне напруження σ , яке діє на відповідні елементи конструкції, може стати як стискуючим (для циліндрів), так і розтягуючим (для пластин і активних елементів стержнів).

У зв'язку з тим, що матеріали конструкцій віх елементів функціональних вузлів механічної міцності вибираються, як правило, не тільки із міркувань міцності, а і з міркувань забезпечення ефективності, герметичності і корозійної стійкості, то звичайно при конструюванні вузлів доводиться вирішувати в основному задачу не вибору матеріалів, а визначення розмірів елементів. При цьому для тих елементів, які опиняються під дією стискаючих напружень, з метою забезпечення тривалої статичної міцності з певною ймовірністю $P(t_{\text{екс}})$ розміри вибираються, виходячи із умови $(\sigma_c + \sigma_y)k_3 \leq \sigma_{\text{гр}}$, де k_3 – коефіцієнт запасу міцності. Таким чином визначаються розміри для елементів, які знаходяться під дією розтягуючих напружень.

У зв'язку з тим, що міцність п'єзокерамічних елементів на розтягування вельми мала, при конструюванні функціональних вузлів механічної міцності електроакустичних приладів доводиться приймати конструктивні заходи по зниженню величин розтягуючих напружень, які діють на п'єзоелементи. Так, в активних елементах пластинчатих приймачів (рис. 2.4, а) в половині біморфного елемента, яка піддається деформації розтягування, п'єзокераміка замінена металом. Це дозволяє суттєво збільшити величину зовнішнього статичного тиску P_c .

В конструкціях стержньових приймачів (рис. 2.8, б) розтягуючі напруження, які створюються поперечними коливаннями активного елемента, що викликається діями ударної хвилі, можуть бути суттєво зменшені за рахунок введення додаткової опори. Це дозволяє змінити граничні умови і, відповідно, форми поперечних коливань активних елементів.

Крім того, вплив розтягуючих напружень, які створюються в конструкціях активних елементів ударними хвилями, може бути ослаблений за рахунок накладання на активний елемент спеціальних стискуючих напружень σ_a , які нейтралізують вплив розтягуючих напружень σ_p .

Таким чином, в загальному випадку умова механічної міцності прийомного приладу може бути сформульована у вигляді $\sigma_c + \sigma_y + \sigma_a k_3 \leq \sigma_{zp}$ при заданій ймовірності $P(t_{\text{екс}})$.

Наближене визначення розмірів конструкцій приймачів можливо здійснити за допомогою співвідношень табл. 2.1. Так, наприклад, для циліндричного приймача силової конструкції з заданою резонансною частотою $\omega_p = c_3 / r_{cep}$ результуюча величина механічного напруження, яка створюється сумісною дією гідростатичного тиску та ударних хвиль, становить $\sigma = \frac{r_3}{d} (p_z + k_\partial p_y) = \frac{r_{cep} + 0,5d}{d} (p_z + k_\partial p_y)$. Використовуючи умову $\sigma k_3 \leq \sigma_{zp}$, визначимо товщину d стінки циліндричного приймача силової конструкції:

$$d = \frac{r_{cep} (p_z + k_\partial p_y)}{\frac{\sigma}{k_3} + \frac{p_z + k_\partial p_y}{2}}.$$

Звідси витікає, що товщина стінки збільшується з ростом гідростатичного тиску p_z і тиску у фронті ударної хвилі p_y і зменшується з ростом міцності $\sigma_{\text{гр}}$

використаних конструкційних матеріалів. Коефіцієнт запасу міцності k_3 вибирається для приймальних приладів рівним $k_3 = 1,5$.

Для циліндричних прийомних приладів компенсованих конструкцій звичайно має місце співвідношення $\sigma_c \ll \sigma_y$. Тому товщина їх стінки визначається значенням тиску у фронті ударної хвилі та вимогами стійкості.

У зв'язку з тим, що кріплення активних елементів випромінюючих приладів силових і розвантажених конструкцій, корпуси стержневих випромінювачів розвантажених конструкцій і фланці випромінювачів силових конструкцій знаходяться в такому ж напруженому стані, як і відповідні елементи конструкцій прийомних приладів, розрахунок їх міцності здійснюється аналогічно.

В загальному випадку на активні елементи випромінюючих елементів поряд з напруженням, що створюється гідростатичним тиском та ударними хвилями, діють статичні стискуючі напруження σ_a , які створюються елементами армування, і циклічні напруження σ_u , утворені збуджуючою електричною напругою. Слід зазначити, що внаслідок малості коефіцієнта використання режиму випромінювання звуку та значних шпаруватостей імпульсів, час дії циклічних напружень звичайно буває в 10...100 разів меншим, ніж час дії гідростатичного тиску. Однак процес накопичення пошкоджень втомлюваності, що створюється циклічними напруженнями, вельми інтенсивний і підлягає обов'язковому врахуванню при розробці конструкцій приладів.

У зв'язку з тим, що пошкодження, які створюються в найбільш поширених типах випромінювачів циклічними напруженнями, практично ніяк не впливають на їх статичну міцність, процеси накопичення статичних і циклічних пошкоджень в основних типах конструкцій сучасних випромінюючих приладів можливо визначити як незалежні. В силу цієї специфіки напруженого стану і

властивостей міцності, активні елементи конструкції випромінюючих приладів доцільно розраховувати окремо:

- на статичну і ударну міцність з урахуванням циклічних напружень та напружень, які створюються елементами армування, с терміном служби, рівним терміну експлуатації під дією тиску.

- на циклічну міцність з урахуванням напружень, які створюються гідростатичним тиском, з ресурсом, рівним числу заданих робочих знакозмінних циклів.

Вибір розмірів (товщини) активного елементу в цьому випадку здійснюється таким же чином, як і у приймачів, але виходячи із умови забезпечення його тривалої статичної міцності $\sigma_c + a_1\sigma_{\text{ц}} + a_2\sigma_y + \sigma_a \leq \sigma_{\text{гр}}$ при заданій ймовірності $P(t_{\text{екс}})$. При цьому σ_y визначається із співвідношення $\sigma_y = \sigma_{0i} \sqrt{W_{\text{пит}}}$ з використанням даних табл. 3.3. Циклічність міцності з урахуванням стискуючих напружень повинна задовольняти співвідношенню $\sigma_{\text{ц}} k_3 \leq \sigma_{\text{ц, гр}}$.

В загальному випадку при дії ударної хвилі в конструкціях випромінювачів збуджуються знакозмінні поперечні коливання активних елементів $\sigma_{y\sim}$. Тому загальною умовою циклічної міцності активного елемента є $(\sigma_{\text{ц}} + a_2\sigma_{y\sim}) k_3 \leq \sigma_{\text{гр}}$. Ця умова повинна виконуватися з заданою ймовірністю $P(N)$. Оскільки величина граничної циклічної міцності $\sigma_{\text{гр}} = f(\sigma_k, S, Z, \lambda)$, то нею можливо керувати за рахунок міцності простих п'єзоелементів σ_k , наявності концентраторів напружень з площею S , величини визначаючого розміру гострих кромek Z та величини коефіцієнта зміцнювання $\lambda(\sigma_{\text{стис}})$, який залежить від величини стискуючих напружень $\sigma_{\text{стис}}$.

Повна циклічна міцність активного елемента $\sigma_y(N)$ при цьому становить $\sigma_y(N) \approx \sigma_y(N)_{\text{ет}} \lambda(\sigma_{\text{стис}}) k_Z k_S k_3$, де $\sigma_y(N)_{\text{ет}}$ – циклічна міцність еталонних елементів; k_Z і k_S – коефіцієнти, які враховують відповідно вплив розміру і форми коливань реальних елементів та розмірів реальних дефектів, k_3 коефіцієнт запасу, який в загальному випадку вибирається рівним $k_3 = 1,5$, а у випадку можливості появи кавітації $k_3 = 2 - 2,5$.

Найбільший вклад в міцність вносять власна циклічна міцність п'єзокераміки σ_k і стискуючі напруження, що створюються елементами армування σ_a та зовнішнім статичним σ_c тиском $\sigma_{\text{стис}} = \sigma_c + \sigma_a$.

За відомою відстанню між електродами п'єзоелемента знаходимо визначаючий розмір активного елемента $L = 2\pi D_{\text{внут}} + \frac{\pi D_{\text{внут}}}{\delta} H$ і коефіцієнт $k_Z = \sigma_{\partial,Z} / \sigma_{\partial,Z,\text{ет}}$. При цьому відстань між електродами п'єзоелементів δ вибирається настільки більшою, наскільки дозволяє електрична міцність; $D_{\text{внут}}$ і H – внутрішній діаметр і висота активного елемента; $\sigma_{\partial,Z}$ і $\sigma_{\partial,Z,\text{ет}}$ – циклічні динамічні міцності залежні від величини визначаючого розміру Z для армованого активного елемента та досліджених (еталонних) елементів. Величина $\sigma_{\partial,Z}$ визначається за рис. 3.6.

За відомими розмірами дефектів в еталонних $S_{\text{ет}}$ і використовуваних S п'єзоелементах знаходимо коефіцієнт $k_S = \sigma_{\partial,S} / \sigma_{\partial,S,\text{ет}}$, де $\sigma_{\partial,S} = f(S_{\text{деф}})$ і $\sigma_{\partial,S,\text{ет}} = f(S_{\text{деф}})_{\text{ет}}$ – циклічні динамічні міцності п'єзоелементів використаного при конструюванні і еталонних, залежна від розмірів дефектів. Величина $\sigma_{\partial,S}$ визначається за допомогою кривих рис. 3.5.

Потім, знаючи залежності $\sigma_u(N)$ конструкцій приладів, прийнятих за еталонні і коефіцієнти k_Z і k_S визначаємо необхідну величину коефіцієнта зміцнення $\lambda = \frac{\sigma_{gr}(N)}{(\sigma_{\pi} + \sigma_y)k_z}$. За кривою зміцнення рис. 3.10 вибираємо величину необхідного армуючого напруження $\sigma_a + \sigma_c = f(\lambda)$. Вибираємо спосіб армування, який забезпечує необхідну величину і точність виконання стискуючого напруження.

Висновки до розділу 3

Виходячи із заданих вимог по енергетичним можливостям підводних електроакустичних перетворювачів протягом заданого терміну у визначених умовах експлуатації визначені фізичні фактори, які обмежують ці можливості. До внутрішніх механічних факторів відноситься динамічна механічна міцність, до зовнішніх – статична механічна міцність, обумовлена гідростатичним тиском і явищем кавітації. Показано, що механічна міцність перетворювача визначається сутністю його найслабшого конструкційного вузла, яким є його активний елемент із п'єзокераміки.

Визначені механічні статичні напруження, що створюється в конструкціях зовнішнім гідростатичним тиском та методологічні підходи до їх розрахунків в залежності від типу конструкції перетворювача.

Запропоновані методологічні підходи до розрахункового визначення механічних динамічних напружень які виникають при коливаннях активних елементів випромінювачів.

Показано що одним із основних заходів по збільшенню динамічної міцності конструкцій випромінювачів є створення в їх п'єзокерамічних елементах

попередніх стискаючих напружень. Запропонована методологія їх чисельного визначення в залежності від типу конструкції випромінювача.

Створенні рекомендації по практичному застосуванню методик розрахунків механічної міцності конструкцій підводних електроакустичних випромінювачів.

РОЗДІЛ 4

МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ПІДВОДНИХ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ ПРИЛАДІВ

4.1. Загальні положення

Електроакустичні прилади є електромеханічними коливальними системами, в яких створення акустичних полів є результатом взаємодії електричних і механічних полів. Тому конструкції цих приладів при їх розробці повинні розраховуватись не тільки на механічну, а й на електричну міцність. Саме електрична міцність є одним із трьох внутрішніх факторів електроакустичних приладів, які обмежують їх енергетичні можливості. Особливо це стосується конструкцій випромінюючих електроакустичних приладів, в яких для забезпечення випромінювання заданих акустичних потужностей можуть бути задіяні потужні електричні поля. Якщо до того ж ці конструкції призначені для роботи протягом тривалого часу в рідинах, то забезпечення їх заданої електричної міцності суттєво ускладнюється порівняно з розробкою конструкцій приладів, які працюють у повітрі. У зв'язку з викладеним велика увага при розробці методів розрахунку електричної міцності конструкцій приділяється саме цим приладам. [3,4, 81-83, 117, 127-130]

Досвід експлуатації електроакустичних приладів в рідинах засвідчує, що фізичними причинами зменшення електричної міцності їх конструкцій є:

- а) руйнування вузлів ізоляції конструкцій під дією часткових електричних розрядів;
- б) природне (теплове) старіння конструкційних електроізоляційних матеріалів;

в) погіршення електричних параметрів електроакустичних приладів, зокрема, зниження електричної міцності ізоляції їх конструкцій по причині зволоження ізоляції активних елементів.

Розробка методів розрахунку електричної міцності конструкцій електроакустичних приладів, які працюють в рідині, являє собою складний теоретичний і експериментальний пошуковий процес, базові результати якого отримані в [3,4, 81-83, 117, 127-130].

Встановлено, що невисока робоча температура електроізоляції електроакустичних приладів (до 65 °С) і електроізоляційні матеріали, які використовуються в конструкціях цих приладів, забезпечують термін служби електроізоляції не менше 25 років. Тому природнім старінням матеріалів можна знехтувати при розробці цих конструкцій. Якщо врахувати те, що сумарний час знаходження ізоляції під електричною напругою відносно малий порівняно з терміном служби електроакустичних приладів, то можливо також знехтувати і електричним старінням ізоляції.

Таким чином, при розробці конструкцій електроакустичних приладів доцільно враховувати результати розрахунків їх електричної міцності, обумовленої зниженням електричної міцності під дією зволоження ізоляції активних елементів та знаходження вузлів активних елементів безпосередньо під робочою електричною напругою, що збуджує електроакустичні прилади.

У випромінюючих приладах, які, як правило, працюють на резонансних частотах, вимога $R_{el} \gg \frac{r_m}{n^2}$, де r_m – механічний опір приладу, а n – його коефіцієнт електромеханічної трансформації, звичайно виконується відносно легко.

Однак, у випромінюючих гідроакустичних приладах, збуджуються електричні поля достатньо великої напруженості E . Це обумовлено тим, що для випромінювання акустичної потужності W_a на частоті резонансу необхідно на

прилад подати робочу електричну напругу U , амплітудне значення якої визначається співвідношенням $U = \sqrt{\frac{2W_a r_s}{n^2 \eta_{m/a}^2}}$, де r_s – опір випромінювання

гідроакустичного приладу, $\eta_{m/a}$ – його механоакустичний коефіцієнт корисної дії. Чисельні значення U досягають величин до 2500 В при відстані між електродами до 20 мм. Очевидно, що в цих випадках існує висока ймовірність пробою використаних електроізоляційних матеріалів [3, 131-132]. Ця ймовірність визначається енергією, яка відповідає забороненій зоні, сталою Больцмана, абсолютною температурою, напруженістю електричного поля, його типом і однорідністю, частотою електричної напруги, вологістю тощо. Оскільки напруженості полів, які збуджують гідроакустичні прилади, достатні для надання електронам енергії W_t , необхідної для подолання забороненої зони, в конструкціях цих приладів повинні бути вжиті заходи щодо підтримки необхідного рівня електричної міцності: $U < U_{gp}$, де U_{gp} – значення електричної міцності гідроакустичного приладу. Таким чином електрична ізоляція конструкцій випромінюючих гідроакустичних приладів повинна відповідати вимогам:

$$[R_{el} > R_{el.gp}; U < U_{gp}]_{P(t)}, \quad \text{де } P(t) \text{ – ймовірність безвідмовної роботи.}$$

В більшості випадків вимога до конструкції випромінюючого гідроакустичного приладу має вигляд: $R_{el.gp} = (30 \div 100) \frac{r_m}{n^2}$.

При розробці конструкцій гідроакустичних приладів велика увага повинна приділятися їх герметизації. Для цього є кілька причин. Оскільки гідроакустичні прилади відносять до таких, де діють, особливо при роботі в режимі випромінювання звуку, великі електричні напруги та струми, а самі прилади працюють в рідинах, які звичайно є електропровідними, необхідно електрично ізолювати конструкцію приладу від робочого середовища.

По друге, які б прості чи складні технічні рішення не використовувались з метою електрично ізолювати один від одного конструкції електроакустичних приладів та робоче середовища, при побудові цих конструкцій як механічних коливальних систем неможливо обійтись без використання полімерних матеріалів, застосування яких забезпечує необхідну свободу здійснення заданих коливальних процесів. Але наявність таких матеріалів в конструкціях приладів завжди обумовлює появу дифузії молекул рідини робочого середовища у внутрішні об'єми цих конструкцій. Тому завдання конструювання полягає в тому, щоб знайти такі конструкторські рішення, при яких площа стикання полімерів з зовнішнім робочим середовищем була якомога меншою, а шлях, який повинні пройти молекули рідини при їх дифундуванні – якомога більшим. Наявність процесу дифузії при експлуатації конструкцій електроакустичних приладів обумовлює зміну зволоженості їх внутрішнього об'єму, величина якої визначає як електричні, так і електроакустичні параметри приладів.

В роботах [3, 4, 6, 54] досліджувався вплив зволоженості на електричні характеристики конструкцій гідроакустичних приладів та підходи до розрахунків їх величини. Однак специфіка конструкцій гідроакустичних приладів, конструкційних матеріалів, що використовуються для їх побудови, та умов експлуатації приладів в рідинах потребують додаткового розгляду питань, пов'язаних із впливом рідинного середовища на їх параметри. Видається доцільним розглянути особливості поведінки різних типів вузлів герметизації в умовах експлуатації конструкцій гідроакустичних приладів та розробити методи розрахунків вузлів герметизації конструкцій приладів на основі аналізу основних фізичних явищ, які відбуваються в них під час експлуатації.

Проникнення молекул рідини до герметичного приладу є результатом наступних процесів [3, 4, 134, 135]:

- а) адсорбції молекул рідини на поверхні герметизуючої оболонки;
- б) дифузії молекул рідини крізь герметизуючу оболонку;

в) сорбції молекул рідини матеріалом герметизуючої оболонки та елементами внутрішнього об'єму конструкції об'єкту;

г) сорбції молекул рідини об'єктом герметизації.

Наслідком цих процесів є зміни певних параметрів герметизованого приладу.

Адсорбція молекул рідини на поверхні герметизуючої оболонки має місце при її контакті з рідиною або з вологим повітрям, коли молекули рідини в результаті теплового руху б'ються об поверхню оболонки і залишаються на ній деякий час. Результатом їх затримки буде збільшення концентрації молекул на поверхні. Якщо за одиницю часу об одиницю площі поверхні б'ється n молекул і затримується на ній протягом середнього часу τ , то на одиниці площі поверхні буде знаходитися n_0 молекул: $n_0 = n\tau$. Число молекул n , які б'ються об поверхню, залежить від парціального тиску пари p :

$$n = 4,68 \cdot 10^{24} \frac{p}{\sqrt{\mu T}},$$

де μ – молекулярна вага і T – абсолютна температура пари. Якщо взяти повітря, відносна вологість якого становить 20 %, то тиск парів води в ньому буде складати $4,65 \cdot 10^2$ Па. Число ударів молекул об $1,0 \text{ м}^2$ поверхні становить

$n = 1,7 \cdot 10^{25} \frac{\text{молекула}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$. Оскільки для покриття 10^{-4} м^2 поверхні молекулами води

мономолекулярним шаром води потрібно 10^{15} молекул, то видно, що адсорбція здійсниться практично миттєво.

Адсорбція молекул рідини матеріалом герметизуючої оболонки починається практично миттєво при контакті з вологим повітрям або з рідиною. Її протяжність визначається дифузією – швидкістю адсорбції. Дифузія математично формулюється у вигляді двох основних законів:

$$P = -D \frac{\partial C}{\partial x} \text{ та } \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial t^2},$$

де P – коефіцієнт проникливості; D – коефіцієнт дифузії; C – концентрація речовини, що сорбується (сорбатар); x – просторова координата; t – час. Перше рівняння характеризує швидкість проникнення молекул рідини через одиницю площі в одиницю часу при одиничному градієнті концентрації рідини. Друге рівняння визначає накопичення молекул рідини в визначеній точці як функцію часу.

Всі полімерні матеріали мають відмінні від нуля коефіцієнти P , D , h , де h – коефіцієнт розчинності. Всі вони в певній мірі сорбують рідину. У деяких матеріалів – скла, кварцу, п'єзокераміки, металів відсутнє об'ємне вологопоглинання і для них потрібно враховувати тільки адсорбовану рідину. Кількість адсорбованих поверхнею молекул залежить від величини τ . За Френкелем $\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{Q_a}{RT}\right)$, де τ_0 – період коливань адсорбованої молекули в напрямі, нормальному до поверхні; Q_a – теплота адсорбції; R – молекулярна газова стала. τ_0 зв'язано з періодом коливань молекул або атомів поверхні і має порядок $10^{-12} \dots 10^{-14}$ с. Час адсорбції τ в основному визначається енергією (теплотою) адсорбції Q_a . Енергія адсорбції визначається силами притягіння між молекулами і поверхнею. Оскільки молекула рідини (води) полярна, то в енергію адсорбції основний вклад вносить дипольна взаємодія, величин якої залежить від величини дипольного моменту молекули, напруженості електричного поля та їх взаємної орієнтації. Енергія дипольної взаємодії для молекул води може складати $4,2 \cdot 10^4$ Дж/моль у випадку адсорбції на іонному кристалі. Якщо для молекул води на п'єзокераміці прийняти $Q_a = 4,2 \cdot 10^4$ Дж/моль, то при температурі 20°C і відносній вологості 65 % тиск парів води становитиме $1,52 \cdot 10^3$ Па, і

$$n \approx 0,55 \cdot 10^{20} \frac{\text{молекула}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с}}. \quad \text{Тоді} \quad n_0 = 0,55 \cdot 10^{20} \cdot 3,2 \cdot 10^{-6} = 17 \cdot 10^{13} \frac{\text{молекула}}{\text{мм}^2}.$$

Одержуємо, що поверхня покрита більш ніж десятком молекулярних шарів води.

В теперішній час відома велика кількість експериментально одержаних ізотерм адсорбції – залежності кількості адсорбованої речовини від тиску її парів при постійній температурі. Всі ці ізотерми умовно поділені на п'ять груп, які відповідають п'яти класифікаційним типам ізотерм, запропонованим Брунауером, Емметом та Теллером [3, 134]. Вони представлені на рис. 4.1, де $V_{\text{адс}}$ – об'єм адсорбованої речовини, p_s – тиск насиченого пару речовини. Ізотерми I типу відповідають мономолекулярній адсорбції. Ізотерми II і III типів характерні для полімолекулярної адсорбції на непористих твердих тілах. Якщо адсорбція супроводжується капілярною конденсацією, то мають місце відповідно ізотерми IV та V типів. Перетинання ізотермою ординати насичення характерно для полярних адсорбатів, таких як вода. Це означає, що насичений водяний пар погано конденсується на адсорбованому шарі води на поверхні твердого тіла. Краплі води можуть знаходитись на ньому, не розтікаючись, тобто крайовий кут $\theta > 0$. Причина цього полягає в особливих властивостях адсорбованого шару води порівняно з властивостями рідини в об'ємі, оскільки адсорбент здійснює вплив на розміщення молекул адсорбата на відстанях, які є значно більшими їх молекулярного діаметру.

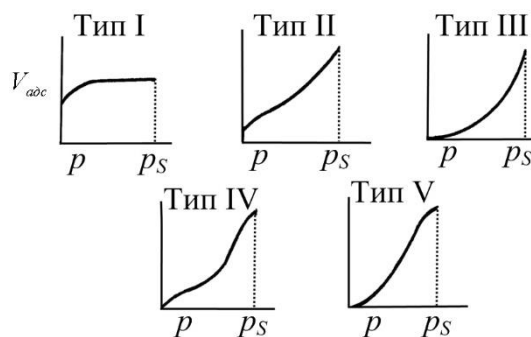


Рис. 4.1. Типи ізотерм адсорбції речовини в залежності від тиску її парів

Таким чином, у вирішенні задачі герметизації конструкцій гідроакустичних приладів, а відтак і електричної міцності, суттєве значення набуває визначення взаємодії молекул рідини з п'єзокерамікою та динаміки сорбції рідини п'єзокерамічними активними елементами та іншими елементами конструкцій приладів, встановлення міри впливу сорбованої рідини на ефективність приладів та розробка методик розрахунків стану герметичності конструкцій в часі. Це дозволяє усунути можливість розтріскування герметизуючої оболонки і встановити вплив зволоження електричної ізоляції активного елемента приладу в результаті дифузії рідини на електричні та електроакустичні параметри гідроакустичних приладів з метою зменшення цього впливу.

4.2. Розрахунки вологостійкості активних елементів в конструкціях гідроакустичних приладів та їх вплив на електричну міцність конструкцій

П'єзокераміка є діелектриком, релаксаційні втрати в якому, обумовлені встановленням поляризації, мають перевагу над втратами провідності в діапазоні ультразвукових та звукових частот (до частоти 32 Гц). Густина залишкової провідності в п'єзокераміці коливається в межах 10^{-12} См/м до 10^{-9} См/м. Зволоження п'єзокераміки перед усім має позначитись на опорі міжелектродної ізоляції завдяки доволі значній провідності води та малій залишковій провідності п'єзокераміки. Чиста вода є полярним діелектриком. Дипольний момент молекули води становить $6,01 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Провідність чистої води порядку $10^{-5} \div 10^{-6}$ См/м і обумовлена частковою дисоціацією води на іони $[H^+]$ та $[OH^-]$. Адсорбція води на поверхні активного елемента обумовлює процеси встановлення теплової іонної та орієнтаційної поляризації в шарі адсорбованої води.

Зволоження п'єзокераміки та величина електричної міцності потребують контролю таких параметрів п'єзоелементів як конденсаторів: опору міжелектродної ізоляції r_0 , тангенса кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta_0$, електричної ємності C_0 . На рис. 4.2 наведені залежності питомого поверхневого опору ρ_s (криві 1,2) та питомої поверхневої провідності $g_s = 1/\rho_s$ (криві 3,4) п'єзокерамічних елементів складів ТБК-3 (хх), ЦТБС-3 (..) та ЦТСНВ-1 (ooo) від відносної вологості φ . Зауважимо, що питомий поверхневий опір п'єзоелементів ρ_s чисельно дорівнює опору $\rho_{\delta\delta}$ адсорбованого шару води δ одиничної довжини $\rho_s = \rho_{\delta\delta}$. Розраховувався ρ_s за формулою $\rho_s = \frac{\Pi}{d} \frac{r_v r_0}{r_v - r_0}$, де Π – протяжність електродів, d – відстань між ними, r_v – об'ємний опір п'єзоелемента.

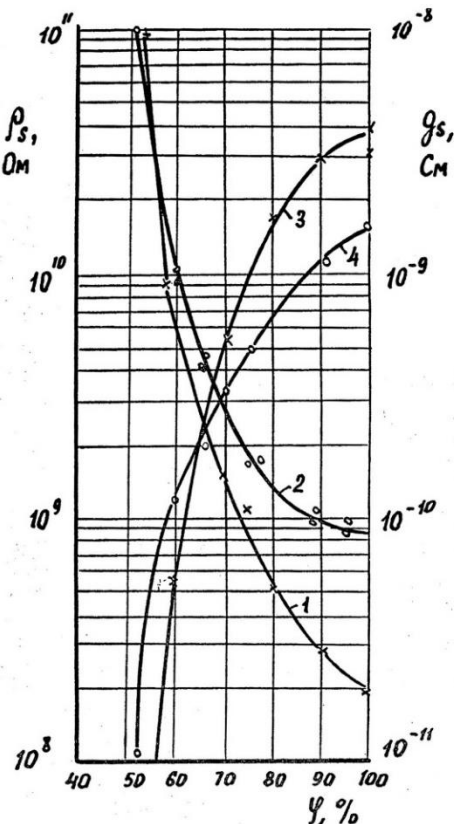


Рис. 4.2. Залежності електричних характеристик п'єзокерамічних елементів від відносної вологості

П'єзокераміка являє собою іонний кристалічний діелектрик. Для неї характерна наявність поблизу поверхні потужного адсорбційного поля, яке інтенсивно адсорбує із оточуючого повітря молекули води, що мають значний дипольний момент. Енергія зв'язку адсорбованих молекул води визначається величиною адсорбційного поля поверхні діелектрика і дипольного моменту води та косинусом кута між їх напрямками. Ця енергія тим більш значна завдяки тому, що молекули води можуть близько підходити до поверхні п'єзокераміки. Величина енергії зв'язку перевищує $4,2 \cdot 10^4$ Дж/моль. Завдяки сильному зв'язку молекул води з поверхнею твердого тіла молекули води в першому шарі не володіють свободою обертання. Утворенню другого адсорбованого шару води на поверхні п'єзокераміки сприяють не тільки дипольні сили, але і водневі зв'язки між молекулами води. Із зростанням числа адсорбованих шарів енергія зв'язку поверхневих молекул води зменшується.

При відносній вологості ϕ більше 60 % має місце капілярна конденсація в порах радіусом більше $20 \cdot 10^{-7}$ мм. Відомо, що поверхня п'єзокерамічних елементів має поверхневі пори таких розмірів, розміщені перпендикулярно поверхні. Саме завершенням заповнення великої кількості пор рідиною, що є характерним для адсорбції на пористих тілах, пояснюється зменшення кута нахилу кривих $g_s(\phi)$ до осі абсцис при збільшенні вологості на рис. 4.2.

Виконати розрахунки питомого поверхневого опору ρ_s п'єзокерамічних елементів можливо згідно з виразом:

$$\rho_s = A_0 \exp \left(k \left(1 - \frac{\phi}{q} \right)^2 \right),$$

де A_0, k, q – сталі величини. Для п'єзокераміки складу ТБК–3 $A_0 = 2,5 \cdot 10^8$, $k = 25$, $q = 1$. Для п'єзокераміки складів ЦТБС–3 і ЦТСНВ–1 $A_0 = 3,7 \cdot 10^8$, $k = 20$, $q = 1,1$. Визначимо кількість адсорбованих шарів води на

поверхні п'єзокерамічного елемента при $\varphi = 100\%$. Розміри елемента прийmemo, наприклад, рівними $\varphi = 100 \times 10 \times 9 \text{ мм}^3$. Питома провідність адсорбованої води при її товщині в кілька сотень молекулярних шарів становить $g_g \cong 10^{-2} \text{ См/м}$.

Опір шару води $R_g = 7,4 \cdot 10^6 \text{ Ом}$. Маємо $R_g = \frac{1}{g_g} \frac{0,009}{0,12\delta}$, звідси товщина шару

становить $\delta = \frac{0,009}{10^{-2} \cdot 7,4 \cdot 10^6 \cdot 0,12} \approx 10^{-6} \text{ м}$. Ефективний діаметр молекули води

становить $3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. Тоді число адсорбованих молекулярних шарів складає величину порядку 3300.

В умовах високої відносної вологості створюються можливості для утворення безперервної плівки адсорбованої води на поверхнях п'єзоелементів, оскільки крайовий кут θ змочування п'єзокераміки водою, при якому краплі води можуть знаходитися на поверхні елемента не розтікаючись на ньому, є низьким і становить $\theta = 40 \dots 50^\circ$.

Для стабілізації поверхневого опору п'єзокерамічних елементів та збільшення електричної міцності гідроакустичних приладів поверхню елементів покривають речовиною з більш високим крайовим кутом змочування. До таких речовин відносять різні лаки, наприклад, лак УР-231 на основі епоксидної смоли ЕД-30 і поліуретану ДГУ з крайовим кутом змочування $\theta = 60^\circ$ та феноло-формальдегідний лак СБ-1С з $\theta = 80^\circ$. Ефективність цих лакових покриттів при короткочасній (криві 1, 2) та тривалій (криві 3, 4) дії вологості показує рис. 4.3, на якому наведені залежності опору міжелектродної ізоляції r_0 п'єзоелемента від відносної вологості п'єзоелементів нелакових (крива 5) та лакованих лаками СБ-1С (криві 1, 3) та УР-231 (криві 2, 4).

Поверхневий опір лакованої п'єзокераміки в меншій мірі залежить від вологості повітря і тим менший, чим вищий крайовий кут змочування покриття.

Формування плівки лаку на поверхні п'єзoeлементa обумовлено взаємодією молекул покриття та іонів кристалічного діелектрика. В цьому випадку має місце достатньо міцний адгезійний зв'язок між лаком та поверхнею п'єзoкeрaміки. Наприклад, величина сили для розриву двох п'єзoкeрaмічних дисків, склеєних лаком УР–231, становить кілька мільйонів паскалів.

При тривалій дії високої відносної вологості відбувається дифузія молекул води через плівку лаку до поверхні п'єзoкeрaміки. Завдяки великому дипольному моменту молекули може чинитися заміщення адсорбційних полярних зв'язків лак – п'єзoкeрaміка на вода – п'єзoкeрaміка. Якщо поверхня п'єзoкeрaміки має водорозчинні домішки, то фізико-хімічні процеси, які розвиваються під дією вологи на поверхні п'єзoкeрaміки, сприяють порушенню адгезійних зв'язків лак – п'єзoкeрaміка.

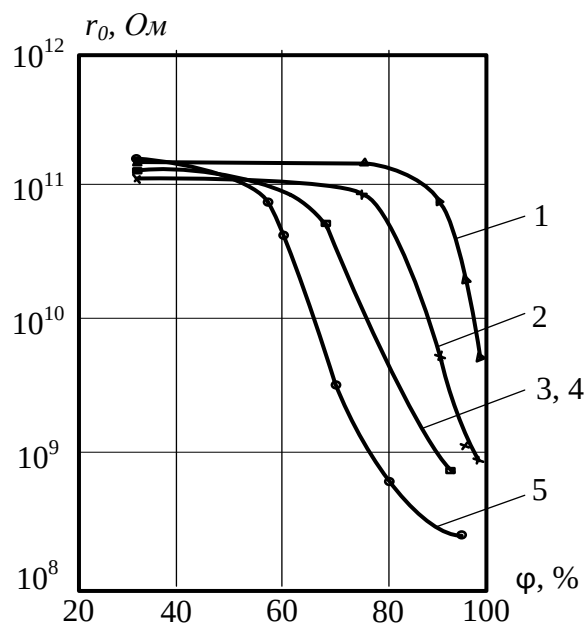


Рис. 4.3. Залежність опору міжелектродної ізоляції r_0 від відносної вологості ϕ для п'єзoкeрaмічних елементів, лакованих лаками СБ–1С (криві 1, 3) та УР–231 (криві 2, 4) та без нанесеного покриття (крива 5)

Особливе значення для активних елементів має не стільки зменшення адгезійної міцності лакового покриття, скільки зміни електричних характеристик зволоженого активного елемента. Для активних елементів важливим є не короточасний ефект від нанесення лакового покриття, а його незмінність при тривалому перебуванні лакованого активного елемента при вологості $\varphi \geq 80\%$. Результати дослідження залежності питомого поверхневого опору ρ_s (криві 1–3) та питомої поверхневої провідності g_s (криві 4–6) лакованих п'єзоелементів із складів ТБК–3 (криві 1, 4), ЦТБС–3 (криві 2, 5) і ЦТСНВ–1 (криві 3, 6) від відносної вологості φ наведені на рис.4.4.

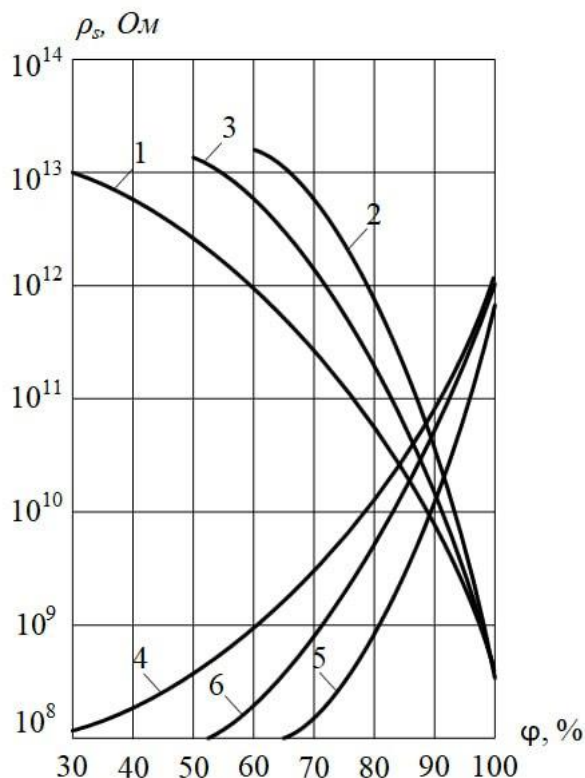


Рис. 4.4. Залежності питомого опору ρ_s (криві 1-3) та питомої поверхневої провідності g_s (криві 4-6) лакованих п'єзоелементів із складів ТБК–3 (криві 1, 4), ЦТБС–3 (криві 2, 5) і ЦТСНВ–1 (криві 3, 6) від відносної вологості φ .

Порівнюючи між собою відповідні криві рис. 4.2 і 4.4 можливо зробити висновок, що порівняно з адсорбованою водою на чистій п'єзокераміці опір води на границі лак – п'єзокераміка вище в діапазоні вологості 60...90 %. Якщо допустити, що провідність адсорбованої води однакова для чистої кераміки і для лакованої, то одержані результати дозволяють зробити наступні висновки:

1. Лак закриває пори на поверхні п'єзокераміки і зменшує явище капілярної конденсації при відносній вологості 60...90 %;
2. Товщина адсорбованої води на границі лак–кераміка трохи менша, ніж на чистій кераміці. Розрахунки показують, що при $g_e \cong 10^{-2}$ См/м число молекулярних шарів становить 2000, що в 1,6 рази менше, ніж на чистій п'єзокераміці;
3. При однаковій вологості питомий поверхневий опір п'єзокераміки збільшується в послідовності ТБК–3, ЦТСВ–1, ЦТБС–3. По мірі ослаблення дії адсорбованого поля на дальні шари води при більш високій вологості різниця між поверхневим опором вказаних складів зменшується.

Для опису залежності питомого поверхневого опору лакованих п'єзоелементів від відносної вологості φ при $\varphi \geq 60\%$ можливо використати формулу

$$\rho_s = B_1 e^{k_1 \varphi^2}, \quad (4.1)$$

де B_1 і k_1 – сталі коефіцієнти, що становлять для складів п'єзокераміки ТБК–3, ЦТСНВ–1, ЦТБС–3, відповідно $B_1 = 2,9 \cdot 10^{13}$ Ом; $2,4 \cdot 10^{14}$ Ом; $1,2 \cdot 10^{16}$ Ом та $k_1 = 7,7$; $5,75$; $7,33$. Одержані залежності дозволяють розрахувати зміни поверхневого і повного опорів міжелектродної ізоляції активних елементів і електричну міцність конструкцій гідроакустичних приладів при різній вологості.

Залежності ємності $C_0(a)$ і тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta_0(b)$ лакованих п'єзоелементів складів ТБК-3 (криві 1, 1'), ЦТБС-3 (криві 2, 2'), ЦТСНВ-1 (криві 3, 3') на частотах 100 Гц і 1000 Гц (криві із штрихом) від відносної вологості ϕ наведені на рис. 4.5.

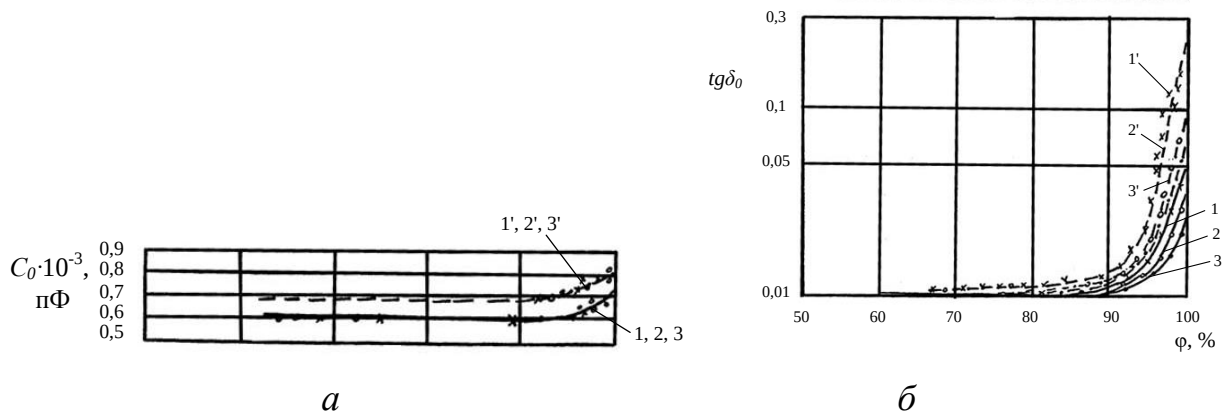


Рис. 4.5. Зміна ємності (а) та тангенса кута діелектричних втрат (б) від відносної вологості ϕ

Хід залежності C_0 і $tg\delta_0$ від вологості є дуже характерним. До вологості 90 % спостерігається невелике збільшення $tg\delta_0$ і постійне значення C_0 на обох частотах. При $\phi > 90\%$ $tg\delta_0$ різко зростає. Оскільки із зростанням вологості зростає число адсорбованих моношарів води, то можливо, що при вологості більше 90 % молекули води в дальніх від п'єзокераміки шарах одержують свободу обертання і можливість іти слідом за змінами електричного поля. Розвиваються процеси теплової орієнтації поляризації в адсорбованій воді. У зв'язку з викладеним спостерігається і зростання $tg\delta_0$ і C_0 .

Зволожений лакований п'єзоелемент можливо представити у вигляді трьохшарового діелектрика з паралельним розміщенням шарів. Згідно з еквівалентною схемою заміщення ємність C_3 і тангенс кута діелектричних втрат $tg\delta_3$ зволоженого п'єзоелемента визначаються виразом:

$$C_3 \operatorname{tg} \delta_3 = C_k \operatorname{tg} \delta_k + C_\epsilon \operatorname{tg} \delta_\epsilon + C_\lambda \operatorname{tg} \delta_\lambda,$$

де $C_k, \operatorname{tg} \delta_k$; $C_\epsilon, \operatorname{tg} \delta_\epsilon$; $C_\lambda, \operatorname{tg} \delta_\lambda$ – ємність і тангенс кута діелектричних втрат відповідно п'єзоелемента, адсорбованої води та лаку. Приймаючи до уваги, що при $\varphi > 90^\circ$ $C_\lambda \ll C_k$, $C_\lambda \ll C_\epsilon$, $\operatorname{tg} \delta_\lambda \ll \operatorname{tg} \delta_k$, $\operatorname{tg} \delta_\lambda \ll \operatorname{tg} \delta_\epsilon$ можливо записати

$$\operatorname{tg} \delta_\epsilon = \frac{C_3 \operatorname{tg} \delta_3 - C_k \operatorname{tg} \delta_k}{C_3 - C_k}.$$

Ємність шару адсорбованої води становить:

$$C_\epsilon = C_3 - C_k = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon \delta \Pi}{d} = C_{\text{ов}} \frac{\Pi}{\delta},$$

де $C_{\text{ов}}$ – питома ємність адсорбованої води.

4.3. Розрахунки дифузії рідини крізь елементи герметизації конструкцій гідроакустичних приладів та їх вплив на електричну міцність конструкцій

Специфіка роботи гідроакустичних приладів в рідині і конструкція активного елемента в значній мірі визначають побудову і конструкцію цих приладів в цілому. Конструкція звичайно являє собою тіло обертання або паралелограм. Тому полімерні деталі частіше всього мають вісь симетрії відповідного конструкції порядку або вище. При всій конструктивній різноманітності полімерних герметизуючих деталей для вирішення питання про вологопроникливість вони можуть бути приведені до еквівалентних плоских та циліндричних оболонок. Прості плоскі та циліндричні оболонки, розрахунок вологопроникливості яких можливо виконувати за відомими формулами [3, 4, 134], одержують, якщо площа поверхні приладів, яка захищається полімером, порівняна з площею поверхні, герметизованої матеріалами, непроникливими для рідини, і можливо знехтувати крайовими ефектами.

Вологопроникливість плоскої оболонки в стаціонарному режимі розраховується за формулами:

$$M = DS \frac{C_2 - C_1}{d} t, \text{ або } M = PS \frac{p_2 - p_1}{d} t, \quad (4.2)$$

де S – площа оболонки; d – товщина оболонки; C_2, C_1 – концентрації води в зовнішньому та внутрішньому поверхневих шарах оболонки відповідно; p_2, p_1 – тиск парів води на зовнішній та внутрішній поверхнях оболонки відповідно; P – коефіцієнт проникливості; D – коефіцієнт дифузії; t – час.

Вологопроникливість циліндричної оболонки

$$M = 2\pi DH \frac{C_2 - C_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} t, \text{ або } M = 2\pi P \frac{p_2 - p_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} t, \quad (4.3)$$

де H – висота циліндричної оболонки, r_2, r_1 – зовнішній та внутрішній радіуси оболонки.

В більшості випадків можливо користуватися тільки формулами (4.2), оскільки для багатьох циліндричних оболонок $r_2/r_1 < 1,25$.

Складені оболонки використовуються для зниження вологопроникливості конструкцій електроакустичних приладів. В стаціонарному стані потік через одиницю поверхні в одиницю часу через складену оболонку однаковий в кожному окремому шарі і становить

$$M = P_i \frac{\Delta p_i}{d_i},$$

де ΔP_i – градієнт тиску парів рідини в i -тому шарі.

Якщо коефіцієнт вологопроникливості кожного шару не залежить від тиску парів рідини і на межі між шарами не існують ніякі поверхневі явища, що протидіють дифузійному потоку рідини, то для складеної оболонки можливо ввести поняття еквівалентного коефіцієнта вологопроникливості $P_{екв}$. Він

визначається як сума середньозважених коефіцієнтів P_i вологопроникливості окремих шарів.

$$\frac{1}{P_{екв}} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{d} \frac{1}{P_i},$$

де n – кількість шарів.

Еквівалентний коефіцієнт розчинності $h_{екв}$ складеної оболонки для стаціонарного потоку визначається як

$$h_{екв} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i d_i}{d},$$

а еквівалентний коефіцієнт дифузії $D_{екв}$ становить:

$$D_{екв} = \frac{P_{екв}}{h_{екв}} = \frac{d^2}{\sum_{i=1}^n h_i d_i \times \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{P_j}}.$$

При великих товщинах оболонок необхідно враховувати час встановлення стаціонарного потоку через оболонку. Час запізнення встановлення стаціонарного потоку через трьохшарову оболонку визначається виразом

$$t_3 = \frac{\frac{d_1^2}{D_1} \left(\frac{d_1}{6D_1h_1} + \frac{d_2}{2D_2h_2} + \frac{d_3}{2D_3h_3} \right) + \frac{d_2^2}{D_2} \left(\frac{d_1}{2D_1h_1} + \frac{d_2}{6D_2h_2} + \frac{d_3}{2D_3h_3} \right)}{\frac{d_1}{D_1h_1} + \frac{d_2}{D_2h_2} + \frac{d_3}{D_3h_3}} +$$

$$+ \frac{\frac{d_3^2}{D_3} \left(\frac{d_1}{2D_1h_1} + \frac{d_2}{2D_2h_2} + \frac{d_3}{6D_3h_3} \right) + \frac{h_2 d_1 d_2 d_3}{D_1 D_3 h_1 h_3}}{\frac{d_1}{D_1h_1} + \frac{d_2}{D_2h_2} + \frac{d_3}{D_3h_3}}.$$

Коефіцієнт дифузії для перехідного режиму може бути одержаним із співвідношення для часу запізнення:

$$D_{екв} = \frac{d^2}{6t_3} = \quad (4.3)$$

$$= d^2 \frac{\frac{d_1}{D_1 h_1} + \frac{d_2}{D_2 h_2} + \frac{d_3}{D_3 h_3}}{\frac{d_1^2}{D_1} \left(\frac{d_1}{D_1 h_1} + \frac{3d_2}{D_2 h_2} + \frac{3d_3}{D_3 h_3} \right) + \frac{d_2^2}{D_2} \left(\frac{3d_1}{D_1 h_1} + \frac{d_2}{D_2 h_2} + \frac{3d_3}{D_3 h_3} \right) + \frac{d_3^2}{D_3} \left(\frac{3d_1}{D_1 h_1} + \frac{3d_2}{D_2 h_2} + \frac{d_3}{D_3 h_3} \right) + \frac{h_2 d_1 d_2 d_3}{D_1 D_3 h_1 h_3}}$$

На відміну від одношарових оболонок велике значення в складених оболонках відіграють коефіцієнти розчинності окремих шарів. В двошаровій оболонці при незначній товщині одного шару по відношенню до другого можливо збільшувати час запізнення в 3 рази порівняно з оболонкою із другого матеріалу такої ж товщини, якщо розчинність рідини в першому шарі буде значно меншою розчинності рідини в другому шарі $h_1 \ll h_2$.

Розглянемо варіант, який часто зустрічається, коли поверхня активного елемента відділена від рідини трьома шарами різних матеріалів – лаку, поліетилену і гуми. В табл. 4.1 наведені дані відносно використаних матеріалів.

Таблиця 4.1

Матеріал	Товщина, мм	P , г/(мм·Па·с)	D , мм ² /с	h , г/(мм ³ ·Па)
Лак УР–231	0,1	$2,08 \cdot 10^{-16}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$
Поліетилен	0,2	$6,24 \cdot 10^{-16}$	$6,4 \cdot 10^{-7}$	$0,98 \cdot 10^{-9}$
Гума С–572	3,0	$2,9 \cdot 10^{-15}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-9}$

Розрахунок еквівалентного коефіцієнта дифузії за формулою 4.4 показав, що $D_{екв} = 1,08 \cdot 10^{-6}$ мм²/с. Це в 1,48 рази менше, ніж коефіцієнт дифузії гуми С–572, яка складає 91 % всієї товщини оболонки. Виграш в часі доволі значний, якщо врахувати мале збільшення товщини оболонки при цьому. Це один з шляхів збільшення електричної міцності конструкцій гідроакустичних приладів.

Оцінимо можливість зменшення коефіцієнта дифузії двошарової оболонки при використанні шару 1, тонкого по відношенню до шару 2, із матеріалу, який

має мінімально можливі для існуючих еластичних полімерних матеріалів коефіцієнти дифузії та розчинності. Еквівалентний коефіцієнт дифузії для двошарової оболонки становить

$$D_{екв} = \frac{d^2 \left(\frac{d_1}{D_1 h_1} + \frac{d_2}{D_2 h_2} \right)}{\frac{d_1^2}{D_1} \left(\frac{d_1}{D_1 h_1} + \frac{3d_2}{D_2 h_2} \right) + \frac{d_2^2}{D_2} \left(\frac{3d_1}{D_1 h_1} + \frac{d_2}{D_2 h_2} \right)}.$$

Згідно з [3, 133] малі коефіцієнти дифузії і розчинності мають фторопласт-3, фторопласт-4 і гума на основі бутилкаучуку. Технологічно простіше виготовляти і використовувати фторопластові плівки товщиною $d_1 = 0,1 \dots 0,3$ мм. Товщину основного герметизуючого матеріалу – епоксидного компаунда УП–592/11 прийемо $d_2 = 5$ мм. Тоді $D_{екв}$ складеної пластини з плівкою із фторопласту-4 становить:

$$D_{екв} = \frac{0,26 \cdot 10^{-4} (1,02 + 4,85) \cdot 10^{15}}{\frac{10^{-8}}{8,35} \cdot 10^{13} (1,02 + 1,45) \cdot 10^{-5} + \frac{2,5 \cdot 10^{-6}}{18,8} \cdot 10^{13} (3,06 + 4,85) \cdot 10^5} = 1,52 \cdot 10^{-6} \text{ (мм}^2/\text{с)}$$

Еквівалентний коефіцієнт дифузії всього на 20 % менший за коефіцієнт дифузії епоксидного компаунду. Коефіцієнт дифузії $D_{екв}$ пластини з плівкою із фторопласту-3 становить:

$$D_{екв} = \frac{0,26 \cdot 10^{-4} (0,6 + 0,485) \cdot 10^{16}}{\frac{10^{-8}}{16,7} \cdot 10^{-4} (0,6 + 1,45) \cdot 10^{16} + \frac{2,5 \cdot 10^{-6}}{18,8} \cdot 10^{13} (3,0 + 0,485) \cdot 10^{16}} = 8,9 \cdot 10^{-7} \text{ (мм}^2/\text{с)}.$$

Коефіцієнт дифузії зменшився в 2,1 рази. Для одержання такого ж ефекту без плівки фторопласту–3 товщину компаунду довелося би збільшити до 7 мм – в 1,41 рази.

Використання шару бутильної гуми (ІРП–1309) товщиною 1 мм знижує коефіцієнт дифузії в 3 рази – $D_{екв} = 6,5 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^2/\text{с}$, а шар гуми товщиною 3 мм

зменшує коефіцієнт дифузії в 6,8 разів $-D_{екв} = 2,78 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^2/\text{с}$. В часі це еквівалентно використанню герметизуючої оболонки із компаунду УП-592/11 товщиною 13 мм.

При існуючих полімерних матеріалах значний вигравш від складених оболонок можливо отримати, якщо товщина додаткового шару складає приблизно 50 % від товщини шару основного матеріалу.

Частіше всього полімерні деталі захищають від рідини невеликі ділянки поверхні між металевими деталями. При цьому полімер може заповнювати цей зазор або не заповнювати його. Прикладом останнього випадку є кільцеві гумові ущільнення у фланцевих та циліндричних з'єднаннях, які герметизують проміжок між металевими деталями, що ущільнюються. Якщо полімерна деталь одночасно є і акустичною розв'язкою рухомих деталей, то полімер повністю заповнює зазор між металевими деталями.

Для наведених випадків побудови конструкцій викладені підходи до вирішення рівняння дифузії на сьогоднішній день не знаходять застосування. Це обумовлено складною конфігурацією полімерних деталей герметизуючої оболонки на різних її ділянках. В той же час розрахункове визначення рівня вологості електроізоляції елементів конструкцій можливо здійснити за допомогою моделей, побудованих на електрогідравлічній, електромеханічній та електротепловій аналогіях процесів. Перевагою електричних моделей є простота вимірювання їх параметрів, їх зручність та точність. Похибка результатів при електричному моделюванні складає кілька відсотків від максимальних значень величин. Моделювання може мати місце тільки для подібних явищ. Для подібності двох явищ – натури та моделі – необхідно, щоб вони описувались однаковими математичними залежностями, мали задані умови однозначності та вибрані із умови подібності крайові умови. Явища подібні, якщо відношення

відповідних величин, які їх характеризують, є постійні числа – константи подібності N .

Випадок двомірної стаціонарної дифузії, який часто реалізується при роботі герметизованого активного елемента, описується рівнянням Лапласа:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x_c^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y_c^2} = 0. \quad (4.5)$$

Плоске поле електричних потенціалів u при проходженні електричного струму в провідному середовищі записується аналогічно:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x_u^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y_u^2} = 0. \quad (4.6)$$

Граничні умови можливо представити таким чином:

$$C|_{l_1} = C_0 \Phi(x_c, y_c); \quad \frac{\partial C}{\partial n_c}|_{l_2} = 0;$$

$$u|_{l_1} = u_0 \Phi(x_u, y_u); \quad \frac{\partial u}{\partial n_u}|_{l_2} = 0.$$

По контуру l_1 задано розподіл концентрації вологи і напруги, а контур l_2 є ізолюваним від дифузії та протікання струму. Константи подоби $\frac{C}{u} = N_c$;

$\frac{x_c}{x_u} = N_x$; $\frac{y_c}{y_u} = N_y$. Підставимо в вираз (4.6) значення параметрів електричного

поля, виражені через параметри дифузійного поля і константи подібності:

$$\frac{N_x^2}{N_c} \frac{\partial^2 C}{\partial x_c^2} + \frac{N_y^2}{N_c} \frac{\partial^2 C}{\partial y_c^2} = 0. \quad (4.7)$$

Для того, щоб рівняння (4.5) та (4.7) були тотожними, потрібно покласти

$$\frac{N_x^2}{N_c} = \frac{N_y^2}{N_c}.$$

Звідси витікає, що константа подібності N_c може бути вибрана довільно. Геометричні розміри електричної моделі вибираються із міркування зручності та точності вимірювань при збереженні геометричної подібності натури і моделі: $N_x = \pm N_y$. Модель може давати пряме і дзеркальне відображення натури.

Таким чином, стаціонарні дифузійні плоскі поля можливо моделювати електричним плоским полем струму в провідному середовищі, причому достатньо геометричної подібності порівнюваних полів. Критерії подібності в цьому випадку відсутні.

При моделюванні нестационарних процесів розподіл концентрації парів рідини задовольняє рівнянню Фур'є. Масштаб часу становить

$$N_t = \frac{t_\partial}{t_{el}} = \frac{V\gamma_{num}}{DC_{el}} = \frac{Vh\gamma_{num}}{PC_{el}}.$$

Взаємна відповідність дифузійних і електричних величин для системи електродифузійних аналогій дана в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Електричні величини	Дифузійні величини	
	1 система	2 система
Напруга, u	Концентрація, C	Тиск парів, p
Заряд, q_{el}	Кількість речовини, M	
Струм, i_{el}	Швидкість потоку, $\frac{\partial M}{\partial t}$	
Питома електропровідність, γ_{num}	Коефіцієнт дифузії, D	Коефіцієнт проникливості, P
Ємність, C_{el}	Об'єм, V	Вологоємність, $V \cdot h$
Час, t_{el}	Час, t_∂	

Для моделювання плоскопаралельних полів можливо використовувати моделі, які виготовляються із електропровідного паперу. Звичайно використовується електропровідний папір з питомим опором 390 Ом. Електроди виготовляються із мідної фольги товщиною 0,1мм і приклеюються до паперу електропровідним клеєм. Провідники до електродів припаюються. Для вимірювання стаціонарного розподілу напруги використовуються методи прямого відліку із шкал електронних приладів.

Продемонструємо наведений метод для рішення кількох найбільш важливих і поширених дифузійних задач. Повернемося до випадку, що був сформульований вище. Зазор між металевими деталями в герметичному відношенні представляє собою замкнену криву (коло, еліпс). Тому при формулюванні граничних умов його можливо розглядати як зазор нескінченної протяжності. Картина стаціонарного поля дифузійного потоку через зазор нескінченної протяжності і його загальні закономірності можливо одержати, якщо вирішувати дифузійну задачу для плоскопаралельного поля в поперечному перерізі зазору. Він наведений на рис. 4.6, де *a* – вузол герметизації; *b* – його модель; 1 – полімер; 2 – металеві деталі; 3 – електропровідний папір; 4 – електроди.

Для дифузії рідини через зазор між двома металевими деталями (2,2) закритий полімерною оболонкою (3), потрібно знайти розподіл концентрації рідини *C* в полімерній оболонці і величину дифузійного потоку через зазор.

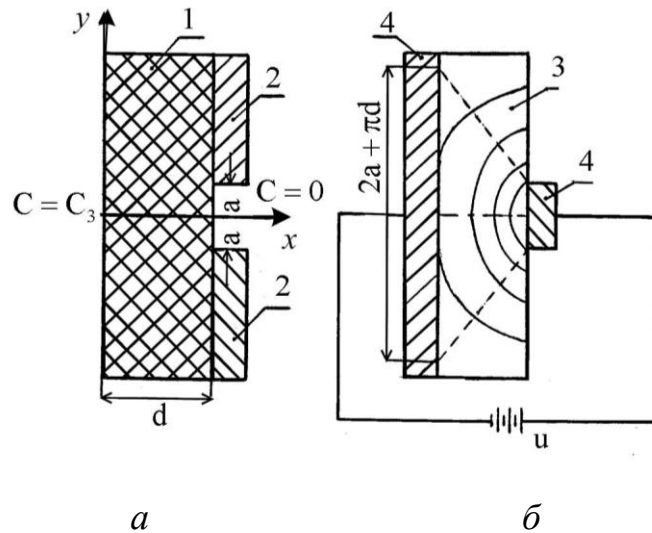


Рис. 4.6. Вузол герметизації (а) і його модель (б): 1 – полімер; 2 – металеві деталі; 3 – електропровідний папір; 4 – електроди

В якості вихідних приймемо рівняння (4.1) і граничні умови:

$$C(0, y) = C_2; C(d, y) = 0; -a \leq y \leq a; \frac{\partial C}{\partial x} = 0; |y| \geq a; x = d.$$

Для моделі вихідне рівняння і граничні умови мають вигляд:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0; u(0, y) = u_{el}; u(d, y) = 0; -a \leq y \leq a; \frac{\partial u}{\partial x} = 0; |y| \geq a; x = d.$$

Плоскопаралельне стаціонарне поле моделюється за допомогою електропровідного паперу. Електрична модель цієї дифузійної задачі зображена на рис. 4.6.

Полімерну оболонку на моделі представляє електропровідний папір. Граничні умови задані за допомогою електродів. Встановлено, що опір смуги d електропровідного паперу необмеженої довжини (вздовж вісі y) можливо визначити наступною залежністю:

$$R = \frac{1}{g\pi} \ln \left(1 + \frac{\pi d}{2a} \right) = \frac{1}{g\pi} \ln \left(\frac{2a + \pi d}{2a} \right).$$

Умова необмеженості практично виконується при довжині $L \geq (2a + \pi d)$.

Тоді опір смуги шириною d нескінченної довжини з одним нескінченно довгим електродом і другим – довжиною $2a$ еквівалентний опору трапеції з основами $2a$

та $(2a + \pi d)$. Електричний струм i_{el} через зазор становить $i_{el} = \frac{u_{el} \pi g}{\ln\left(1 + \frac{\pi d}{2a}\right)}$.

Порівняємо одержану величину електричного струму через зазор з електричним струмом i_n через пластину із електропровідного паперу довжиною d і шириною

$2a$ з опором $\frac{d}{2ga}$:

$$K_1 = \frac{i_{el}}{i_n} = \frac{\pi d}{2a} \frac{1}{\ln\left(1 + \frac{\pi d}{2a}\right)}. \quad (4.8)$$

Вираз $\frac{\pi d}{2a \ln\left(1 + \frac{\pi d}{2a}\right)}$ назовемо коефіцієнтом збільшення струму K_1 через

зазор внаслідок наявності крайового ефекту. Залежність K_1 від співвідношення між шириною зазору $2a$ і товщиною шару d наведена на рис.4.7.

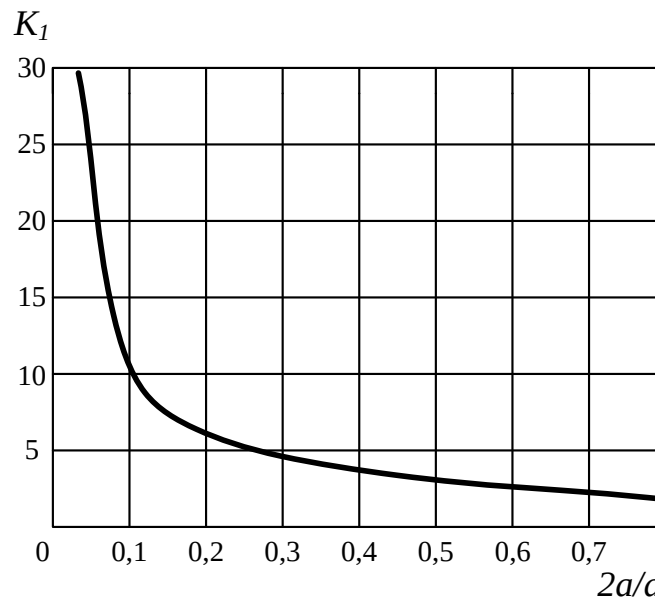


Рис. 4.7. Залежність коефіцієнта збільшення струму від розмірів шару

Із формули (4.4) витікає, що швидкість дифузійного потоку через зазор шириною $2a$, герметизований полімерним шаром товщиною d , більша швидкості дифузійного потоку через пластину товщиною d з площею, рівною площі зазору. Різниця між швидкостями потоків збільшується при збільшенні товщини герметизуючої оболонки при незмінній ширині зазору. Збільшення швидкості потоку визвано дифузією рідини в зазор із області полімерної оболонки, яка прилягає до зазору. Визначення процесів дифузії з допомогою метода електричних аналогій дозволило встановити існування обмеженої зони впливу зазору в нескінченному полімерному шарі, який герметизує цей зазор. За межами довжини $(2a + \pi d)$ від центру зазору в обидві сторони зволоженого полімерного шару здійснюється так, як воно здійснювалось би при відсутності зазору. Розглянутий випадок проявлення крайового ефекту особливо важливий для розрахунку вологопроникливості гумових ущільнень.

Зазор між ущільнюваними деталями герметизується гумовим кільцем, розміри поперечного перерізу якого значно перебільшують величину зазору. Звичайно при розрахунку проникливості ущільнення припускається, що в якості ефективної площі проникнення можливо брати площу деформованого гумового кільця, оскільки опір самого зазору проходженню парів рідини зневажливо малий. Очевидно це буде справедливо тільки в тому випадку, коли гумове ущільнююче кільце не прилягатиме до поверхні ущільнюваних деталей на стороні зазору. Але така поведінка конструкції рідко зустрічається в практиці герметизації апаратури, що працює в рідині. Гумове кільце під дією гідростатичного тиску щільно облягає всю поверхню ущільнюючої канавки в районі зазору. При відносно невеликому гідростатичному тиску, величина якого залежить від розміру зазору і твердості гуми ущільнюючого кільця, це кільце не видавлюється в зазор.

Розглянемо циліндричне (а) та фланцеве (б) ущільнення гумовим кільцем 1, наведені на рис.4.8.

В циліндричному ущільненні площа зазору залежить від різниці в діаметрах ущільнюваних деталей: «отвору» D_2 і «валу» D_1 :

$$S_y = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2) = \frac{\pi}{4}(D_2 - D_1)(D_2 + D_1).$$

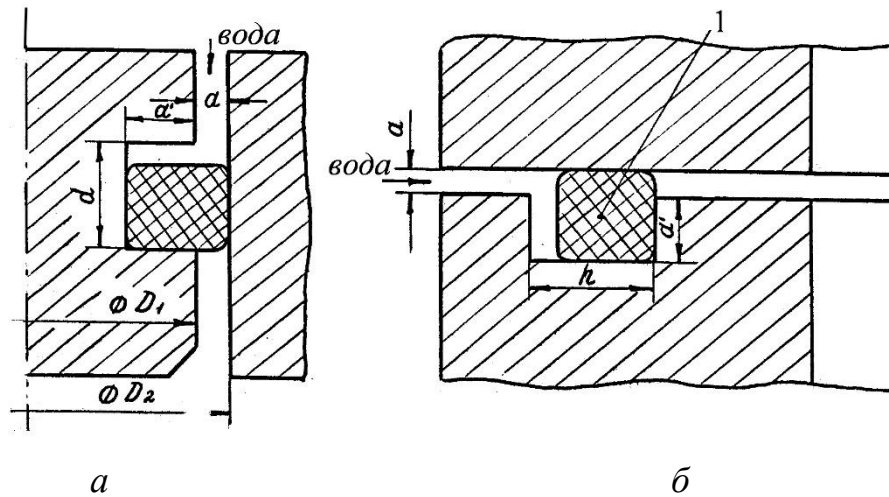


Рис. 4.8. Циліндричне (а) і фланцеве (б) ущільнення: 1 – гумове кільце

В багатьох випадках діаметри отвору і валу мало відрізняються один від одного. Тому можливо записати:

$$S_y = \frac{\pi}{4} \cdot 2D_1(D_2 - D_1) = \frac{\pi}{2} D_1(D_2 - D_1) = \frac{\pi}{4} D_1 a.$$

Товщину шару d гумового ущільнення над зазором визначимо, виходячи із умови нестиснення гуми:

$$\frac{\pi D_0^2}{4} = d(a + a'); \quad 2a = D_2 - D_1; \quad d = \frac{\pi D_0^2}{4(a + a')},$$

де a' – глибина ущільнюючої канавки; D_0 – діаметр перерізу гумового кільця.

Дифузійний потік в одиницю часу має вигляд:

$$M'_d = P \frac{d}{S_y} = P \frac{2\pi D_0^2}{\pi(D_2 + D_1)a \cdot 4(a + a')} = P \frac{D_0^2}{2a(D_2 + D_1)(a + a')}. \quad (4.9)$$

У фланцевому ущільненні зазор між ущільнюваними деталями залежить від чистоти обробки їх поверхні. Максимальна величина його дорівнює подвоєній висоті гребінців нерівностей, відповідаючих даному класу обробки поверхні деталей. Площа поверхні у фланцевому ущільненні залежить від розміру h гумового кільця в радіальному напрямі, який визначається із співвідношення:

$$\frac{\pi D_0^2}{4} = h(a + a'); \quad h = \frac{\pi D_0^2}{4(a + a')}.$$

Швидкість дифузійного потоку через циліндричний шар у фланцевому ущільненні буде:

$$M'_\delta = 2\pi P \frac{1}{\ln \left[\frac{D + \frac{2\pi D_0^2}{4(a + a')}}{D} \right]} = 2\pi P \frac{1}{\ln \left[1 + \frac{\pi D_0^2}{2D(a + a')} \right]} \quad (4.10)$$

Таким чином, наведені підходи демонструють можливості при конструюванні гідроакустичних приладів вибирати розміри герметизуючих елементів складної геометрії з метою забезпечення їх заданої електричної міцності.

4.4. Методики розрахунків герметичності конструкцій гідроакустичних приладів різних типів та впливу герметичності на електричну міцність конструкції

Розв'язання рівняння дифузії для процесів проникливості рідини через полімерні деталі є одним з необхідних елементів в створенні методики розрахунку часу ефективної роботи конструкції гідроакустичного приладу. У загальному випадку часовий термін роботи конструкції приладу в рідині

залежить від вимог до електроакустичних характеристик гідроакустичних приладів, величини і направленості дифузійного потоку через герметизуючу оболонку, вологості внутрішнього об'єму та вологостійкості активного елемента. Наявність даних по характеристикам вологості полімерних матеріалів, результати дослідження адсорбції рідини на п'єзокераміці, її вплив на електричні та електроакустичні характеристики електроакустичних приладів дозволяють розробити методики розрахунків часу роботи конструкцій приладів в рідині по електричній міцності з необхідною ефективністю. Така методика є необхідною при розробці їх конструкцій. Розглянемо методики розрахунку герметичності і пов'язаної з нею електричної міцності кількох типів конструкцій гідроакустичних приладів.

Одна із поширених конструкцій таких приладів має у своєму складі циліндричний секціонований активний елемент висотою H . Його зовнішня поверхня герметизована гумовим чохлом товщиною d , а внутрішня порожнина з торців закрита металевими фланцями, причому $H \gg d$. Між гумовим чохлом і лакованим активним елементом знаходиться чохол із поліетилену товщиною 0,2 мм. Гумовий чохол має натяг 5...10 %. Розміри призми із п'єзокераміки складу ТБК-3 секціонованого кільця: висота $H = 71,6$ мм, ширина зовнішньої сторони – $l = 7,6$ мм. Число призми в кільці – 48 одиниць. Активний елемент конструкції приладу складається із трьох кілець, склеєних торцями один до одного. Зміна електричних параметрів електроакустичного приладу стане здійснюватись тоді, коли молекули рідини, що дифундують через герметизуючу оболонку, пройдуть через лакове покриття і почнуть адсорбуватись на зовнішній поверхні п'єзокераміки.

Для визначення часу роботи конструкції, як розглядається, необхідно розв'язати рівняння $\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ (C – концентрація речовини, що сорбується, D

– коефіцієнт дифузії), яке визначає накопичення молекул рідини у визначеній точці x як функцію часу t .

Граничні умови при цьому мають вигляд: $C = 0$ для всіх x при $t = 0$; $C = C_s$ при $x = d$; $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$ при $x = 0$. Оскільки $H \gg d$, то крайовими ефектами в такій конструкції можливо знехтувати. Час зміни концентрації рідини в плівці лаку, яка граничить з поверхнею п'єзокераміки, можливо визначити згідно з виразами [3, 133]

$$\tau = -\frac{4d_{екв}^2}{\pi^2 D_{екв}} \ln \left[\frac{\pi^2}{8} \left(1 - \frac{C}{C_s} \right) \right], \quad \frac{D_{екв} \tau}{d_{екв}^2} > 0,1, \quad (4.11)$$

або

$$\tau = -\frac{4d_{екв}^2}{\pi^2 D_{екв}} \ln \left[\frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_s} \right) \right], \quad (4.12)$$

де $d_{екв}$ – загальна товщина трьохшарової оболонки із гуми, поліетилену і лаку; $D_{екв}$ – еквівалентний коефіцієнт дифузії трьохшарової оболонки; φ – відносна вологість. Загальна товщина трьохшарової оболонки дорівнює сумі товщин окремих шарів $d_{екв} = d_1 + d_2 + d_3$.

Оскільки нас цікавить концентрація рідини безпосередньо на поверхні п'єзокераміки, то герметизуючу оболонку можливо охарактеризувати еквівалентним коефіцієнтом дифузії $D_{екв}$, який визначає швидкість дифузії рідини через герметизуючу оболонку. В той же час він надає уявлення про розподіл концентрації вологи по товщині оболонки. Еквівалентний коефіцієнт дифузії розраховується за формулою (4.3). Параметри кожного шару герметизуючої оболонки і параметри еквівалентної одношарової оболонки наведені в таблиці 4.3. Формула (4.11) дає можливість, використовуючи дані табл.4.3, розрахувати залежність концентрації рідини в лаку на границі з поверхнею п'єзокераміки від часу. Оскільки безпосередній вимір концентрації

рідини на поверхні активного елемента в конструкції електроакустичного приладу є неможливим, для експериментальної перевірки розрахунків за формулою (4.11) потрібно розрахувати повний опір міжелектродної ізоляції R_0 .

Таблиця 4.3

Оболонка	Товщина шару d , мм	Коефіцієнт дифузії $D_{екв}$, мм ² /с	Коефіцієнт розчинності рідини h , г/(мм ³ ·Па)
Гума С-572	3,0	$0,7 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$
Поліетилен	0,2	$0,64 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Лак УР-231	0,2	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
Еквівалентна одношарова оболонка	3,4	$0,58 \cdot 10^{-6}$	$8,5 \cdot 10^{-5}$

Для цього визначаємо залежність питомого поверхневого опору ρ_s лакованої п'єзокераміки від вологості оточуючого середовища за формулою

(4.1). Поверхневий опір призми становить $r_s = \rho_s \frac{l}{H} = \rho_s \frac{7,6}{71,6} = 0,106\rho_s$. Для

активного елемента конструкції приладу одержимо

$R_s = \frac{0,106}{144} \rho_s = 7,4 \cdot 10^{-4} \rho_s$, Ом. Опір міжелектродної ізоляції активного

елемента, який визначається об'ємною провідністю п'єзокераміки, становить

$R_V = 5,5 \cdot 10^8$ Ом. Повний опір міжелектродної ізоляції R_0 визначається виразом

$$R_0 = \frac{R_s R_V}{R_s + R_V} = \frac{L \rho_s [C(t)] V_k \rho_v}{L \rho_s [C(t)] + V_k \rho_k}, \quad (4.13)$$

де L , V_k – коефіцієнти, які залежать від конструкції активного елемента і визначають поверхневий і об'ємний опір активного елемента. Із виразів (4.1), (4.12), (4.13) одержуємо

$$R_0(\tau) = \frac{\varepsilon_1 \exp \left[-K_1 \left(1 - \frac{4}{\pi} \exp \left(-\frac{\pi^2 D_{екв}}{4d^2} \tau \right) \right)^2 \right] V_k \rho_k}{\varepsilon_1 \exp \left[-K_1 \left(1 - \frac{4}{\pi} \exp \left(-\frac{\pi^2 D_{екв}}{4d^2} \tau \right) \right)^2 \right] + V_k \rho_k}, \quad (4.14)$$

$$\varepsilon_1 \exp = LB_1.$$

Залежності опору міжелектродної ізоляції конструкції активного елементу від часу, розраховані згідно з виразом (4.14), наведені на рис. 4.9. Криві 1, 2, 4, 5 наведені для конструкції гідроакустичного приладу, криві 3, 6 описують поведінку R_0 в часі лакованого активного елемента з чохлам із поліетилену. Криві 1–2 розраховані для $D_{екв} = 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^2/\text{с}$, а криві 4–5 для $D_{екв} = 3,2 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^2/\text{с}$. Значками на рисунку позначені експериментальні данні.

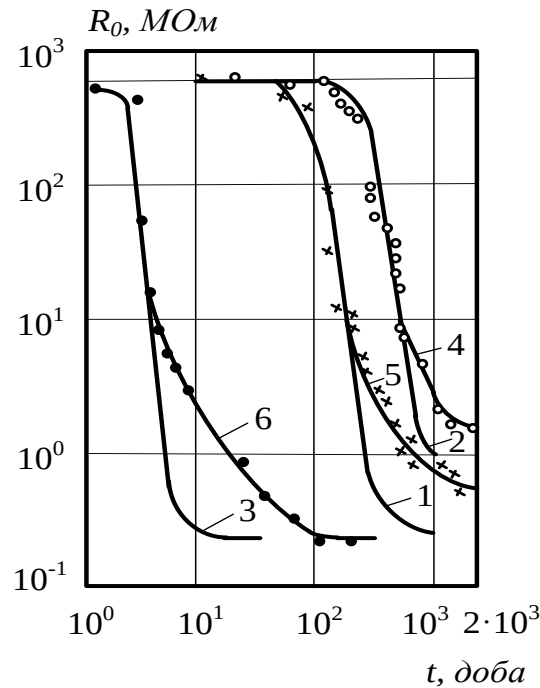


Рис. 4.9. Залежності опору міжелектродної ізоляції R_0 конструкції активного елемента електроакустичного приладу від часу t

Герметизація конструкції гідроакустичних приладів з газоподібним заповненням виконується переважно за допомогою металу, оскільки герметизуюча оболонка повинна витримувати великі гідростатичні тиски. Полімерні герметизуючі матеріали, наприклад, гуми, використовуються на невеликій площі порівняно з загальною площею поверхні герметизуючої оболонки. Це місця забезпечення герметичності вводу кабелю і акустичні розв'язки активного елемента в конструкції гідроакустичного приладу від конструкційних деталей. Виходячи з міркувань збереження статичної міцності герметизуючої оболонки полімерні деталі герметизують зазори між металевими деталями шириною не більше 2...3 мм і мають значну товщину – не менше 10 мм. Наслідком цього є велике значення часу затримки встановлення стаціонарного дифузного потоку рідини через герметизуючу оболонку і мала величина цього потоку.

Для визначення часу роботи конструкції гідроакустичного приладу з необхідною ефективністю можливо скористатися першим рівняння дифузії у вигляді [133]:

$$dM = P \frac{(p_2 - p_1)}{d} S dt,$$

де dM – елементарна маса проникаючої вологи через площу S ; P – коефіцієнт проникливості вологи; p_2 – тиск парів рідини ззовні герметизуючої оболонки; p – тиск парів рідини у внутрішньому об'ємі конструкції приладу.

Рідина, яка проникла у внутрішній об'єм конструкції приладу, частково буде знаходитися в об'ємі, зайнятому газом, а частково сорбується внутрішніми полімерними деталями. Тому можливо записати:

$$dM = \sum \left(V_i h_i + \frac{V_o \mu}{RT} \right) dp, \quad (4.15)$$

де V_i , h_i – об’єм і коефіцієнт вологорозчинності в i -тій полімерній деталі; V_0 – об’єм, заповнений газом; μ , R , T – відповідно молекулярна вага, стала Больцмана та абсолютна температура пару.

Різноманіття полімерних герметизуючих деталей можливо розкласти на пластини і циліндричні чохла різної конфігурації. Для однієї пластини і одного циліндричного чохла в герметизації конструкції електроакустичного приладу проникаючу вологу можливо визначити виразом:

$$dM = \left(\frac{P_n S_n}{d_n} + 2\pi P_u \frac{H}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \right) (p_2 - p) dt, \quad (4.16)$$

де P_n , P_u – коефіцієнти вологопроникливості пластини і циліндричного чохла відповідно.

Рівняння (4.15) справедливо в тому випадку, коли час становлення рівноваги у внутрішньому об’ємі конструкції після надходження чергової кількості рідини малий порівняно з часом, протягом якого здійснюється надходження цієї кількості. Ця умова виконується у випадку, що розглядається, оскільки коефіцієнт дифузії води в газоподібному середовищі значно перевищує коефіцієнт дифузії в полімерах. Сорбція води полімерними деталями здійснюється достатньо швидко, якщо відношення квадрату товщини i -тої деталі до коефіцієнта дифузії води в ній менше відповідного відношення для герметизуючої оболонки, тобто

$$\frac{d_i^2}{D_i} < \frac{d^2}{D}. \quad (4.17)$$

Це відношення звичайно виконується, оскільки товщина внутрішніх полімерних деталей менше товщини герметизуючої оболонки, а коефіцієнт дифузії не менший коефіцієнта дифузії оболонки. Це дозволяє при розрахунках

вважати тиск парів рідини однаковим по всьому внутрішньому об'єму конструкції приладу.

Прирівняємо праві частини рівняння (4.15) та (4.16) і розділимо змінні:

$$\frac{\sum V_i h_i + \frac{V_o \mu}{RT}}{\frac{P_n S_n}{d_n} + 2\pi P_u \frac{H}{\ln \frac{r_2}{r_1}}} \frac{dp}{p_2 - p} = dt.$$

Проінтегруємо останнє рівняння, прийнявши за час встановлення стаціонарного потоку вологи $t = 0$ і відповідаючий цьому часу тиск парів рідини у внутрішньому об'ємі конструкції приладу за $p = p_0$. Тоді

$$\int_{p_0}^p \frac{\sum V_i h_i + \frac{V_o \mu}{RT}}{\frac{P_n S_n}{d_n} + 2\pi P_u \frac{H}{\ln \frac{r_2}{r_1}}} \frac{dp}{p_2 - p} = \int_0^{\tau_c} dt.$$

Після інтегрування маємо:

$$\tau_c = \frac{\sum V_i h_i + \frac{V_o \mu}{RT}}{\frac{P_n S_n}{d_n} + 2\pi P_u \frac{H}{\ln \frac{r_2}{r_1}}} \ln \frac{p_2 - p_0}{p_2 - p}.$$

Для газонаповнених конструкцій гідроакустичних приладів вираз під знаком інтегралу можливо перетворити, маючи на увазі те, що відношення p_0/p_2 та p/p_2 дорівнюють з похибкою 2...3 % відповідно початковій φ_0 та поточній φ відносним вологостям у внутрішньому об'ємі конструкції приладу:

$$\tau_c = \frac{\sum V_i h_i + \frac{V_o \mu}{RT}}{\frac{P_n S_n}{d_n} + 2\pi P_u \frac{H}{\ln \frac{r_2}{r_1}}} \ln \frac{1 - \varphi_0}{1 - \varphi}. \quad (4.18)$$

При збільшенні вологоємності внутрішнього об'єму час досягнення відносної вологості ϕ в ньому зростає. Граничним випадком може бути варіант, коли у внутрішньому об'ємі конструкції приладу розміщують вологопоглинальні патрони. Час досягнення відносної вологості ϕ теоретично може бути збільшений в багато разів. Але збільшення часу роботи приладів обмежено довговічністю герметизуючої оболонки. В формулі (4.18) найпростіше визначається об'єм V_0 , який заповнюється газом – повітрям, елєгазом. Для коефіцієнта вологопроникливості P вибирається максимальне значення. Кількість і розміри вологоємних деталей у внутрішньому об'ємі конструкції приладу залежать від прийнятої герметизації активного елемента, яка визначає шляхи поширення дифузійного потоку та швидкість його поширення. Цими ж міркуваннями визначається і залежність опору міжелектродної ізоляції від вологості у внутрішньому об'ємі конструкції гідроакустичних приладів. Звичайно адсорбція рідини здійснюється не на всій поверхні активного елемента, а на визначеній частині його. Природно, що при цьому мається на увазі конкретний час зволоження – термін служби приладу, оскільки протягом необмеженого часу зволожиться вся поверхня активного елемента.

Розрахуємо час роботи наповненого повітрям гідроакустичного приладу, конструкція якого показана на рис 2.7,а. Більшу частину герметизуючої оболонки складають металеві деталі – фланці 5 та бандаж 2. Зазори між металевими деталями герметизуються гумовими деталями 3 і 4. Крім того, за допомогою гуми герметизується ввід проводу. Однак конструкція вводів кабелів в гідроакустичних приладах така, що у всіх випадках дифузійним потоком рідини через вводи можливо знехтувати у зв'язку з його малою величиною.

Дифузійний потік рідини буде проходити в зазор між бандажем і фланцем і потім розподілятися на два потоки, які оминають активний елемент 1. Один потік буде зволожувати повітря у внутрішньому об'ємі і деталі, які знаходяться в

ньому. Другий потік буде зволожувати гумовий чохол, що знаходиться між активним елементом і бандажем.

Завдяки великій довжині гумового чохла (приблизно 180 мм) поверхня активного елемента з боку цього чохла за термін служби приладу (5...10 років) практично не зволожиться. Тому при розрахунках залежності R_0 активного елемента у внутрішньому об'ємі потрібно враховувати тільки його внутрішню і торцеву поверхні.

Секціонований активний елемент складається із двох секціонованих кілець, які мають по 72 призми (рис. 4.10), що чергуються. Площа сріблення обох призм однакова, але призма (б) ширше призми (а). Оскільки секціоновані кільця з'єднані один з одним торцями, то зволожуваними поверхнями будуть внутрішня поверхня призми по висоті і один з торців. Об'ємний опір активного елемента приладу становить $R_V = 1,6 \cdot 10^8$ Ом. Поверхневий опір $R_s = 1,04 \cdot 10^{-3} \rho_s$ Ом. Поверхня п'єзoeлемента покрита лаком СБ-1С.

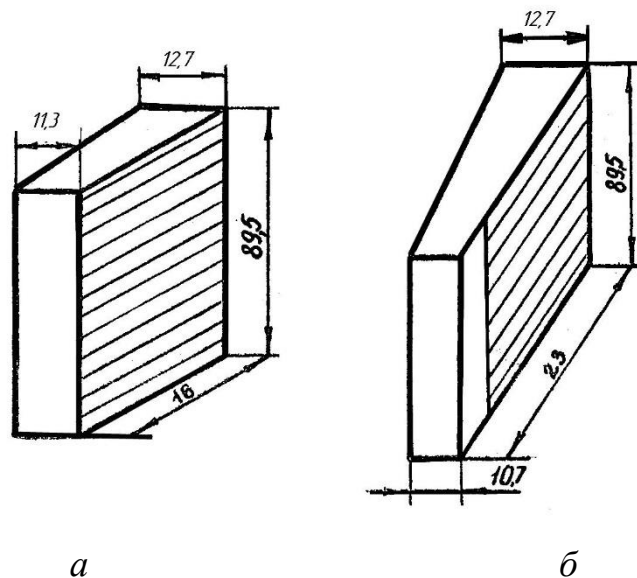


Рис. 4.10. Призми для виготовлення циліндричного секціонованого активного елемента

Для проведення розрахунків часу зволоження внутрішнього об'єму визначимо вологоємність внутрішнього об'єму, поверхність і товщину гумової герметизуючої оболонки. Об'єм повітря становить $5 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$. Вологоємними деталями у внутрішньому об'ємі є гетинаксові монтажні пластини, електроізоляційне кільце із гуми С-572 та електроізоляційні прокладки із гуми 8615. Коефіцієнти вологорозчинності h та дифузії D деяких матеріалів наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Матеріал	Гетинакс	Текстоліт	Поліхлорвініл	Лак СБ-1С	Лак УР-231
Коефіцієнт дифузії $D \cdot 10^6, \text{ мм}^2/\text{с}$	28	28	0,56	0,23	0,11
Коефіцієнт розчинності $h \cdot 10^8, \text{ г}/(\text{мм}^3 \cdot \text{Па})$	2,6	2,6	0,075	0,12	0,12

Товщина всіх деталей не перевищує 2мм. Якщо врахувати, що коефіцієнт дифузії матеріалу внутрішніх деталей не менше коефіцієнта дифузії оболонки, то відповідно виконується співвідношення (4.17). Загальна вологоємність деталей складає $\sum V_i h_i = 0,3 \cdot 10^{-2} \text{ г/Па}$. Максимальний коефіцієнт вологопроникливості гумової оболонки дорівнює $2,9 \cdot 10^{-15} \text{ г}/(\text{мм} \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$. Основні труднощі викликає визначення ефективної площі S_{ef} і товщини d_{ef} герметизуючої оболонки у зв'язку із складною конфігурацією полімерних деталей оболонки, як це видно із рис. 2.7. Тому визначення значень S_{ef} та d_{ef} виконувалось за допомогою метода електродифузійних аналогій згідно з моделлю вузла герметизації, зображеною на рис. 4.11, де 1, 2 – електроди, 3 – герметизуюча оболонка, 4 – ізолятори.

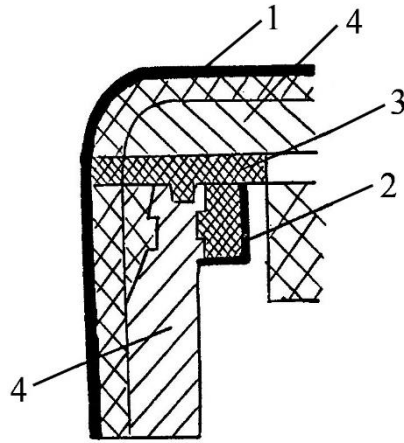


Рис. 4.11. Моделі вузла герметизації зі складною конфігурацією полімерів

Рідина стикається з вузлом герметизації на поверхні 1. Випарування рідини у внутрішньому об'ємі здійснюється з поверхні 2. Товщина оболонки моделі дорівнює товщині реальної оболонки, а площа прийнята рівною площі зазору. Коефіцієнт K , який враховує вплив крайового ефекту, визначається із порівняння величин електричних струмів, що протікають в моделях цих вузлів герметизації, виконаних із електропровідного паперу. Електроди розміщувались в місцях контакту рідини з деталями герметизації та в місцях випаровування сорбованої рідини у внутрішній об'єм. Експериментально визначений коефіцієнт $K = 1,3$. Значить $S_{ef} = KS = 1,3S$. Якщо підставимо одержані дані у формулу (4.18) будимо мати

$$\tau_c = 36 \cdot 10^3 \frac{0,4 \frac{5 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}}{1,03}}{1,4 \cdot 10^{-8} \cdot 66} \cdot 15 \ln \frac{1 - \varphi_0}{1 - \varphi} = 2,5 \cdot 10^5 \ln \frac{1 - \varphi_0}{1 - \varphi}. \quad (4.19)$$

Умови герметизації конструкцій гідроакустичних приладів такі, що вологонасиченість внутрішніх деталей звичайно не перевищує 30...50 %. Тому розрахунок часу зволоження зроблено для двох значень початкової вологості: $\varphi' = 30\%$ і $\varphi'' = 50\%$.

Для конструкції приладу, що розглядається, розрахунок за формулою (4.19) показує, що за 8 років вологість у внутрішньому об'ємі приладу не повинна змінитися. Одержаний результат є закономірним для газонаповнених конструкцій електроакустичних приладів, які мають відносно невелику площу і великі товщини частини герметизуючої оболонки, виконаної із полімерних матеріалів, в даному випадку із гуми.

Експериментальна перевірка розрахунків за формулою (4.19) може бути здійснена через визначення залежності опору міжелектродної ізоляції конструкцій гідроакустичних приладів від вологості φ . Позначивши

$$\frac{1}{\theta} = \frac{\sum V_i h_i + \frac{V_o \mu}{RT}}{\frac{P_n S_n}{d_n} + 2\pi P_u \frac{H}{\ln \frac{r_2}{r_1}}},$$

перепишемо вираз (4.18) таким чином

$$\varphi = 1 - \frac{1 - \varphi_0}{e^{\theta \cdot \tau_c}}. \quad (4.20)$$

Потім на основі виразів (4.14) і (4.20) одержимо:

$$R_0(\tau) = \frac{\varepsilon \exp \left[-K_1 \left(1 - \frac{1 - \varphi_0}{e^{\theta \tau}} \right)^2 \right] V_k \rho_k}{\varepsilon \exp \left[-K_1 \left(1 - \frac{1 - \varphi_0}{e^{\theta \tau}} \right)^2 \right] + V_k \rho_k}.$$

Наступний варіант герметизації конструкції газонаповненого електроакустичного приладу зображено на рис. 4.12, де 1 – активний елемент, 2 – фланець, 3 – бандаж, 4 – акустична розв'язка, 5 – внутрішній гумовий чохол.

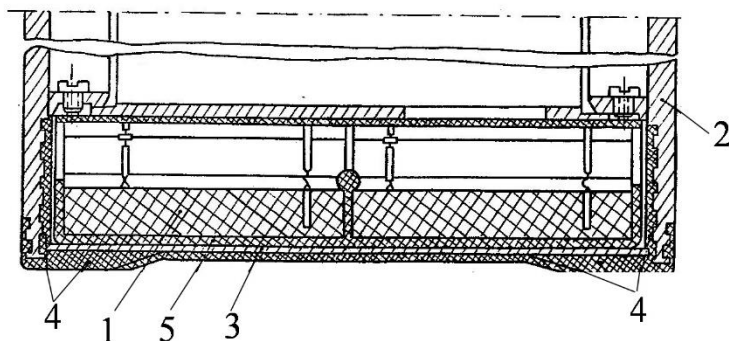


Рис.4.12. Модель вузла герметизації газонаповненого приладу

Лакований активний елемент 1, який складається із двох секціонованих кілець, герметизований двома металевими фланцями 2 та металевим бандажем 3. Зазор між металевими деталями герметизовано гумою С-572 4. П'єзокерамічні кільця ізольовані від бандажа гумовим чохлом 5 із гуми 8615. Між собою п'єзокерамічні кільця з'єднані через кільце із гуми 8615. Ця конструкція відрізняється від попередньої деталями герметизації зазору між бандажем та фланцями. Герметизуюча манжета привулканізована до фланців і потім ставиться на клею на бандаж, завдяки чому утворюється друга доповнююча перешкода рідині, поряд з ущільненням торців бандажа гумовими пластинами з внутрішньої поверхні фланців. Дифузний потік рідини через гумову деталь 4 розподіляється на два потоки: один потік іде по гумовому чохла 5 між активним елементом і бандажем, другий потік, випаровуючись з внутрішньої поверхні деталі 4, зволожує внутрішній об'єм конструкції приладу. Через велику довжину гумового чохла 5 – більше 180 мм, зволоженням зовнішньої поверхні активного елемента можливо знехтувати протягом строку служби приладу. Також можливо знехтувати і зволоженням торців секціонованих кілець, якими вони склеєні один до одного через гумове кільце. Активна частина секціонованих кілець складається із 90 призм. Розміри призм демонструє рис. 4.13. Об'ємний опір

активного елемента становить $R_V = 1,5 \cdot 10^8$ Ом, а поверхневий опір $R_s = 1,6 \cdot 10^{-3} \rho_s$ Ом. Об'єм повітря в конструкції приладу $V_0 = 22 \cdot 10^6$ мм³.

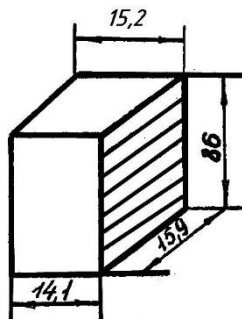


Рис. 4.13. Розміри призм для виготовлення секціонованих кілець

Гумова деталь 4 герметизуючої оболонки являє собою циліндр по відношенню проникнення вологи через неї. Однак оскільки відношення внутрішнього діаметра до зовнішнього менше 1,25, то при розрахунках її можливо замінити плоскою оболонкою. Тоді коефіцієнт K для визначення ефективної поверхні проникнення вологи можливо встановити аналогічно попередньому випадку. Заміри електричного струму для двох моделей вузлів герметизації (рис. 4.14), зроблених із електропровідного паперу, дали величину $K = 1,23$. На рис. 4.14 зображені: 1, 2 – електроди, 3 – герметизуюча оболонка простої форми (без врахування крайового ефекту), 4 – ізолятори.

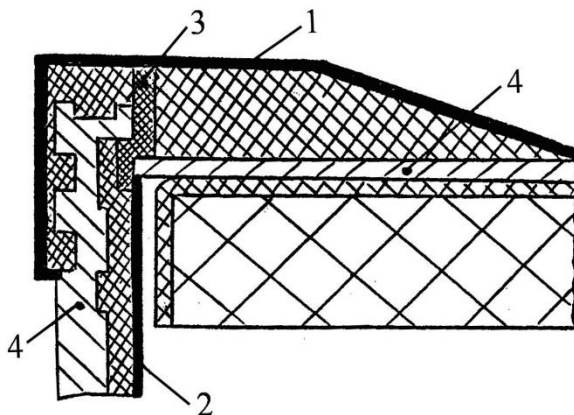


Рис. 4.14. Модель вузла герметизації складної конфігурації

З урахуванням цього ефективна площа проникнення вологи становить $S = 9840 \text{ мм}^2$ при товщині $d = 17 \text{ мм}$. Коефіцієнт вологопроникливості гуми 8615 становить $P = 2,9 \cdot 10^{15} \text{ г/(см} \cdot \text{с} \cdot \text{Па)}$. Підставимо чисельні значення величин у формулу (4.18):

$$\tau_c = 3,6 \cdot 10^3 \frac{0,0758 + 0,0213}{98,4 \cdot 1,4 \cdot 10^{-8}} \cdot 1,7 \ln \frac{1 - \varphi_0}{1 - \varphi} = 5 \cdot 10^4 \ln \frac{1 - \varphi_0}{1 - \varphi}. \quad (4.21)$$

Розрахунки зміни вологості у внутрішньому об'ємі конструкції приладу виконаємо за формулою (4.21) для $\varphi' = 30 \%$ і $\varphi'' = 50 \%$. При великій товщині герметизуючої оболонки необхідно враховувати час затримки встановлення дифузійного потоку через оболонку:

$$\tau_s = \frac{d^2}{6D} = \frac{17^2}{6 \cdot 16,1 \cdot 10^7} = 3 \cdot 10^7 \text{ (с)}.$$

Час затримки становить приблизно 1 рік. Розрахована залежність опору міжелектродної ізоляції $R_{ot} = R_o(t)$ зображена на рис. 4.15, де 1, 2 – залежності від початкової відносної вологості у внутрішньому об'ємі 30 % та 50 % відповідно, 3 – експериментальні значення.

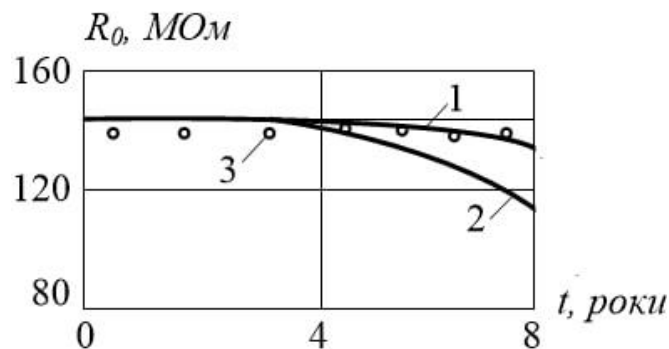


Рис. 4.15. Розраховані залежності опору міжелектродної ізоляції. 1, 2 – залежності від початкової відносної вологості у внутрішньому об'ємі 30% та 50% відповідно, 3 – експериментальні значення.

Таким чином, протягом терміну служби конструкції гідроакустичного приладу опір міжелектродної ізоляції не повинен змінюватися, тобто закладена величина електричної міцності гідроакустичного приладу зберігається.

4.5. Методи розрахунків концентрації парів рідини в конструкціях гідроакустичних приладів різних типів та вплив парів рідини на електричну міцність конструкцій

Для розрахункового забезпечення розробки конструкцій гідроакустичних приладів в частині оцінки протидії процесам дифузії парів рідини потрібно розробити розрахункові моделі цих конструкцій. З точки зору граничних і початкових умов, які реалізуються в сучасних конструкціях гідроакустичних приладів, а також механізмів дії парів рідини на електроізоляційні характеристики цих приладів, конструкції гідроакустичних приладів можливо поділити на наступні групи [4, 134].

1. Компенсовані конструкції, герметизовані полімерними або полімерно-металевими оболонками при наявності їх адгезії до активного елемента у вигляді п'єзокерамічного тіла. Розрахункова модель цієї групи представлена на рис. 4.16, *а* і має для аналізу процесів дифузії з кожної сторони п'єзокераміки системи з трьох шарів. Відмінною особливістю цієї моделі є те, що в процесі зволоження шару полімеру здійснюється зниження його електричного опору $R_{el}(C)$ і електричної міцності $U_{np}(C)$.

2. Розвантажені, силові і компенсовані маслозаповнені конструкції, та конструкції, герметизовані полімерними оболонками, які не мають адгезії до активного елемента. Розрахункові моделі по дифузії таких конструкцій мають два різновиди, зображені на рис. 4.16, *б* і 4.16, *в*. Особливості цих моделей полягають в тому, що в процесі зволоження шару масла чиниться зниження його

електроізоляційних характеристик, а при зволоженні повітря можливе виділення шарів води і випадіння роси на поверхню активного елемента, завдяки чому його електроізоляційні характеристики знижуються. Коефіцієнти дифузії парів рідини в повітрі і маслі в цьому випадку можливо прийняти нескінченними.

3. Розвантажені, силові і компенсовані маслозаповнені конструкції при наявності в їх складі спеціально вбудованих осушувачів (наприклад, патронів з силікагелем). Їх розрахункова модель відрізняється від попередньої тим, що концентрація парів в об'ємі газу чи рідини залишається сталою до насичення осушувача.

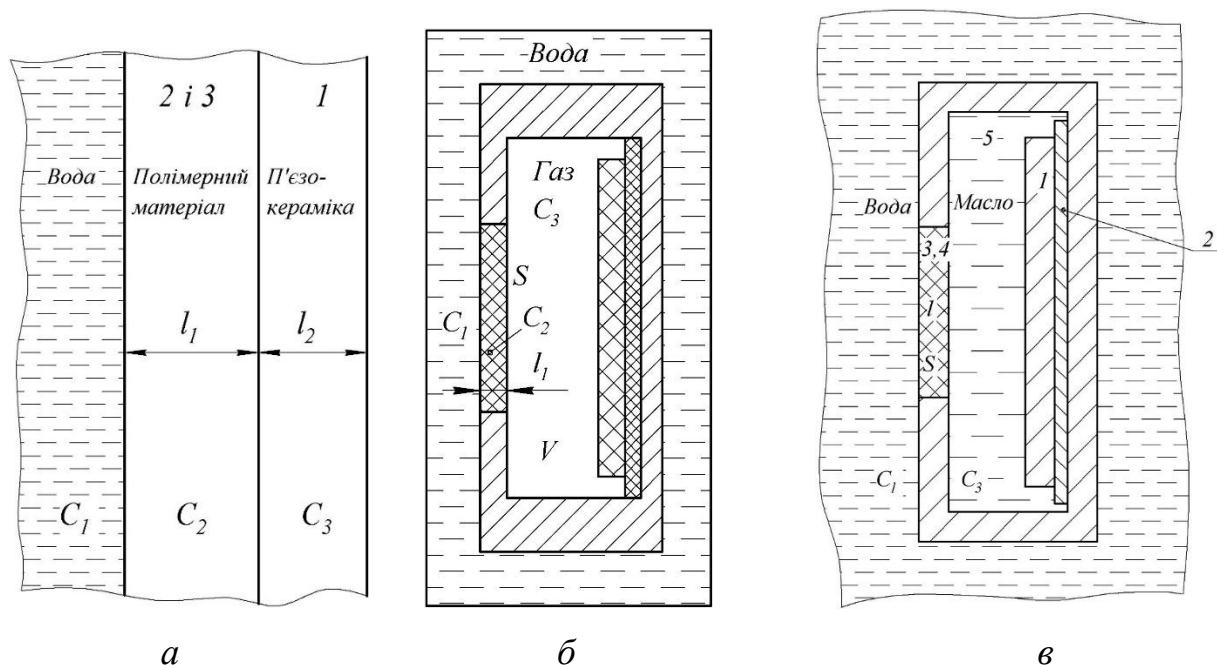


Рис 4.16. Групи приладів для розрахунків процесів дифузії

Якщо конструкція гідроакустичного приладу включає в себе кілька елементів герметизації, які відображаються різними розрахунковими моделями, то результуюча концентрація парів води C_{Σ} в її внутрішньому об'ємі V дорівнює відношенню повної кількості парів рідини, які пройшли скрізь всі елементи герметизації, Q_{Σ} , до внутрішнього об'єму гідроакустичного приладу:

$$C_{\Sigma} = Q_{\Sigma} / V .$$

Таким чином, електричний стан конструкції гідроакустичного приладу визначається концентрацією парів рідини в ній. Остання може бути знайдена як результат рішення диференційного рівняння дифузії для відповідної розрахункової моделі. Знайдемо ці рішення, що описують процеси дифузії парів рідини, для наведених вище розрахункових моделей при відповідних граничних і початкових умовах.

Розробка методик розрахунку часу вологозахисту для конструкцій першої та другої групи розглянуто в [4], тому зосередимо увагу на розгляді розрахункових моделей для перетворювачів третьої групи, яка описує розвантажені, силові і маслозаповнені конструкції, що мають полімерні герметизуючі оболонки і осушуючі пристрої у внутрішніх об'ємах.

Граничні і початкові умови для цієї моделі, а також розподіл концентрації парів рідини в приладі з осушуючим патроном представлені на рис. 4.17 і мають вигляд: концентрація пару в рідині $C = C_1$ при $x \leq 0$ для всіх t ; концентрація пару в полімері $C = C_0$ при $0 < x < l$ і $t = 0$; концентрація пару в газі (рідині) $C = C_2 = \text{const}$ при $x = l$ і $t = t_n$, де t_n – час насичення поглинача.

В результаті розв'язання рівняння дифузії таким же методом одержуємо наступне співвідношення для визначення концентрації парів в полімерній оболонці:

$$C_{об} = C_1 + (C_2 - C_1) \frac{x}{l} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_2 \cos n\pi - C_1 \sin \frac{n\pi x}{l}}{n} \exp\left(-\frac{Dn^2\pi^2 t}{l^2}\right) + \frac{4l_0}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)} \sin \frac{(2m+1)\pi x}{l} \exp\left[-\frac{D(2m+1)^2\pi^2 t}{l^2}\right]. \quad (4.22)$$

Пар, який проходить крізь поверхню S полімерної оболонки при $x = 0$, поглинається оболонкою та осушувачем. Повна кількість поглиненого пару Q дорівнює кількості пару, який пройшов через поверхню оболонки:

$$Q = \int_t \frac{\partial C}{\partial t} V dt = - \int_t D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} S dt.$$

Із (4.22) знаходимо:

$$\frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{C_2 - C_1}{l} + \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} (C_2 \cos n\pi - C_1) \exp\left(-\frac{Dn^2\pi^2 t}{l^2}\right) + \frac{4C_0}{l} \sum_{m=0}^{\infty} \exp\left[-\frac{D(2m+1)^2\pi^2 t}{l^2}\right]$$

Тоді

$$Q = DS \frac{C_2 - C_1}{l} t - \frac{2lS}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_2 \cos n\pi - C_1}{n^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{Dn^2\pi^2 t}{l^2}\right) \right] - \frac{4C_0 l S}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{D(2m+1)^2\pi^2 t}{l^2}\right] \right\}. \quad (4.23)$$

Очевидно, що процес поглинання пару є нестационарним тільки до моменту насичення полімерної оболонки. Із виразу (4.23) одержуємо, що повна кількість поглиненого пару становить:

$$Q = DS \frac{C_1 - C_2}{l} t - \frac{DC}{l} \left[\frac{2l^2}{D\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{C_2 \cos n\pi - C_1}{n^2} \right) + \frac{4C_0 l^2}{\pi^2 D} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \right] \approx \frac{DS}{l} \left[(C_1 - C_2)t - \frac{C_2 l^2}{6D} + \frac{C_1 l^2}{3D} - \frac{C_0 l^2}{2D} \right].$$

При цьому осушуючим пристроєм поглинається пар, який проходить через оболонку в стаціонарному режимі. Кількість його становить:

$$Q_2 = \frac{DS}{l} (C_1 - C_2)t.$$

Кількість пару, який поглинається оболонкою, дорівнює:

$$Q_1 = \frac{DS}{l} \left(-\frac{C_2 l^2}{6D} + \frac{C_1 l^2}{3D} - \frac{C_0 l^2}{2D} \right).$$

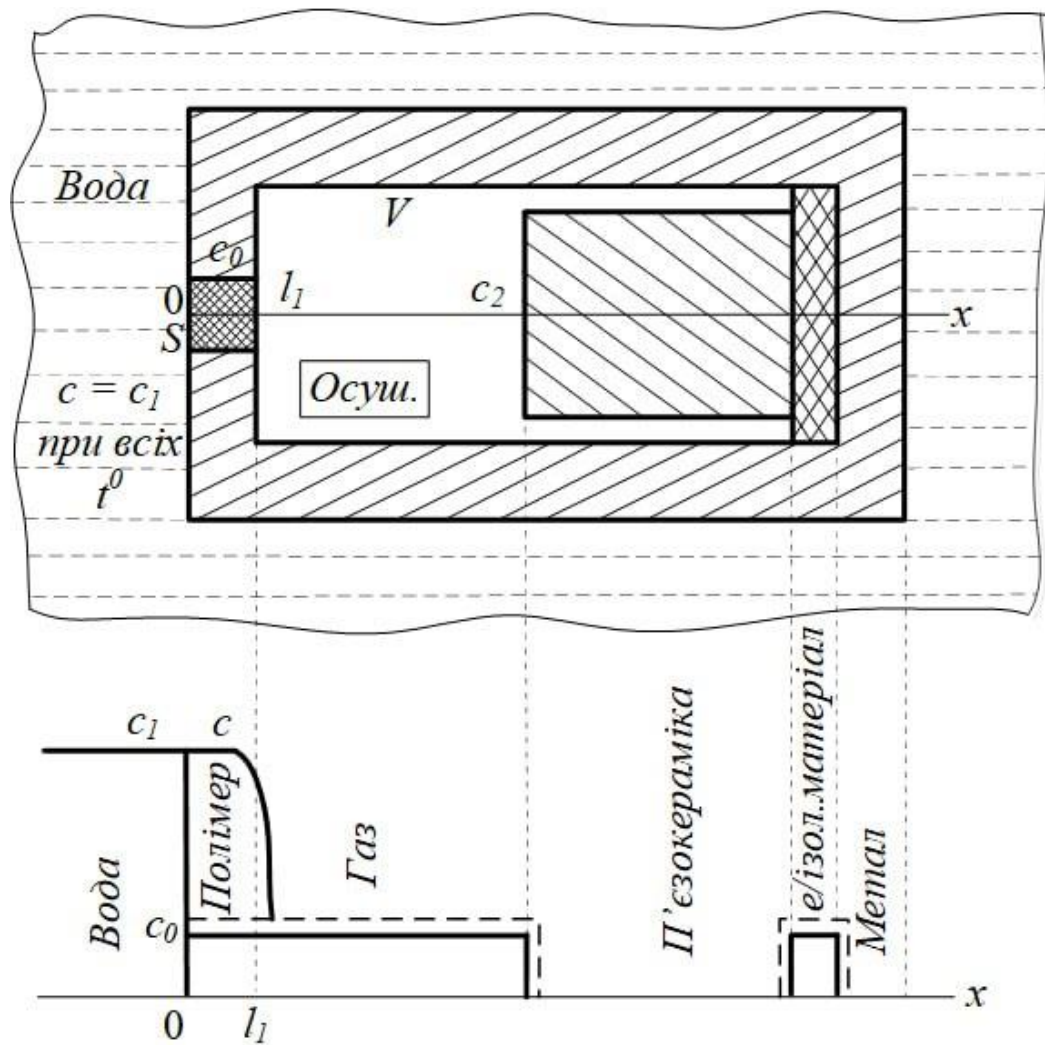


Рис 4.17. Схема конструкції приладів з наявністю в їх складі спеціально вбудованих осушувачів; граничні і початкові умови задачі

Потік пару, який проходить в стаціонарному режимі крізь оболонку, по першому закону Фіке становить:

$$p = DS(C_1 - C_2) \frac{1}{l}.$$

Таким чином насичення поглинача може бути досягнуто за термін часу

$$t = \frac{Q_c l}{DS(C_1 - C_2)}, \text{ де } Q_c - \text{кількість рідини, яку може поглинути осушуючий}$$

пристрій. Величина Q_c визначається виразом: $Q_c = \Phi \cdot M$, де Φ – поглинаюча властивість одиниці ваги осушуючої речовини, M – маса речовини.

Якщо повну кількість вологи, яка пройшла крізь полімерну оболонку при $x = 0$, віднести до величини стаціонарного потоку p , то можливо наближено визначити повний термін часу насичення поглинача і полімерної оболонки. Він становить:

$$t_n \approx \frac{Ql}{DS(C_1 - C_2)} = t_{oc} + \frac{1}{C_1 - C_2} \left(-\frac{C_2 l^2}{6D} + \frac{C_1 l^2}{3D} - \frac{C_0 l^2}{2D} \right) = t_{oc} + t_{об}.$$

Таким чином, величина t_n залежить від поглинальної властивості осушувача і полімерної оболонки, товщини, коефіцієнта дифузії та площі поверхні полімерної оболонки.

Протягом цього терміну концентрація пару у внутрішньому об'ємі конструкції приладу залишається рівною початковій. Після закінчення терміну $t = t_n$ осушуючий пристрій потрібно замінити новим. Вага осушуючої речовини, необхідної для поглинання парів, що проникли в конструкцію електроакустичного приладу, становить $M = Q_c / \Phi$.

Повний термін часу t_Σ , який потрібно мати для досягнення граничної концентрації пару у внутрішньому об'ємі конструкції електроакустичного приладу з вбудованим осушувачем, дорівнює сумі часу насичення паром осушувача t_n і часу досягнення граничного значення концентрації пару в об'ємі газу (рідини) t_ϵ : $t_\Sigma = t_n + t_\epsilon$.

Наведені вище дані свідчать про те, що для розрахунків концентрації парів рідини у внутрішніх об'ємах конструкцій гідроакустичних приладів необхідно знати характеристики вологості конструкційних матеріалів – коефіцієнти дифузії D , проникливості P і поглинання h . В таблиці 4.5 представлені всі ці характеристики для ряду практично цікавих матеріалів. Слід враховувати, що

між характеристиками вологості кожного матеріалу існує [133] функціональна залежність $P = hD$. В таблиці 4.6 наведені дані про температурні діапазони, що допускаються, і характеристики, які описують адгезійні властивості і стійкості сучасних герметизуючих матеріалів до таких агресивних факторів, як світло, озон та суспензії мастил.

Таблиця 4.5

Марка матеріалу	Характеристики вологості матеріалу		
	$P \cdot 10^{16}$, г/(мм·с·Па).	$D \cdot 10^6$, мм ² /с	$h \cdot 10^{10}$, г/(мм ³ ·Па)
Гума С-572	3,86	0,69	5,55
Гума С-576	5,21	1,33	3,90
Гума 8615	5,42	5,56	0,97
Гума РС-1-НТ	3,54	13,89	0,24
Поліетилен	0,63	0,064	9,75
Компаунд УП-590-11	8,98	2,25	4,05
Поліуретан СКУ-ПФЛ	39,6	1,53	25,5

Підсумовуючи все сказане, зауважимо, що завданням конструювання гідроакустичного приладу є вибір при відомих розмірах його активного елемента та вимогах до електричних характеристик $R_{ел}(t_{ексн}, P_{ексн})$ та $U_{np}(t, P_{ексн})$ приладу раціонального варіанту конструкції вузла герметизації, конструкційних матеріалів та розмірів деталей із умов $[C < C_{zp}]_{P(t_{ексн})}$. В загальному випадку вузол герметизації складається із незалежно працюючих таких конструктивних вузлів, як струмовводи, кріплення активного елемента та елементи герметизації поверхонь приладів.

Розглянемо послідовність конструювання вузла герметизації з використанням наведеного розрахункового забезпечення на прикладі циліндричного електроакустичного приладу силової конструкції. Виходячи з відомих умов $[R_{ел} < R_{ел.zp}]_{P(t_{ексн})}$ або $[U < U_{zp}]_{P(t_{ексн})}$ і залежностей

$R_{el} = f_1(C)$ і $U = f_2(C)$, визначаємо граничну концентрацію парів рідини в конструкції приладу, яка допускається. З часом концентрація парів рідини в конструкції приладу в процесі його експлуатації поступово нарощується.

Таблиця 4.6

Марка матеріалу	Температурний діапазон, °C	Світлоозоно-стійкість	Масло-стійкість	Адгезія до металу, кг/см ²
Гума С-572	-30 ÷ +50	стійка	стійка	34
Гума С-576	-30 ÷ +50	стійка	стійка	67
Гума 8615	-40 ÷ +50	стійка	нестійка	24
Гума РС-1-НТ	-30 ÷ +50	менш стійка ніж С-572	стійка	24
Поліетилен	-50 ÷ +60	стійкий	стійкий	8
Компаунд УП-590-11	-60 ÷ +100	стійкий	стійкий	200
Поліуретан СКУ-ПФЛ	-50 ÷ +100	стійкий	стійкий	-

Встановимо зв'язок між середньою товщиною герметизуючого покриття на основі кращих герметизуючих матеріалів і середнім терміном $\bar{t}_{zp}$ досягнення

$$\bar{C}_{zp} : \bar{t}_{zp} = \frac{\bar{V} \bar{l}_1}{DS} \ln \frac{(\bar{C}_1 - \bar{C}_3) \cdot \bar{B}_1}{\bar{C}_1 - \bar{C}_{zp}}.$$

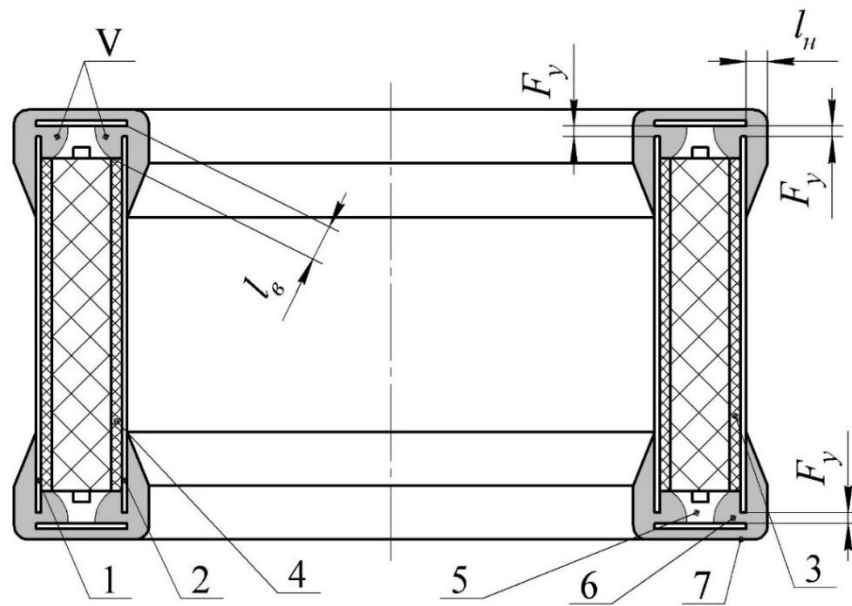
Застосуємо наведені вище результати для оцінки часу захисту від вологи конструкцій випромінювачів, герметизованих металополімерними оболонками. Досвід експлуатації конструкцій циліндричних компенсованих випромінювачів в оболонках із полімерних матеріалів (утворених епоксидними компаундами ЕТ-120-65 та УП-592-11, гумою С-572 або поліуретаном) товщиною 3–6 мм показав, що їх довговічність по герметичності не перевищує 1–2 років безперервної експлуатації в рідині. При цьому опір ізоляції знижується з $1400 \cdot 10^6$ Ом до

величини, меншої 10^6 Ом. Враховуючи, що проблему суттєвого (в 5–10 разів) підвищення довговічності таких випромінювачів неможливо вирішити шляхом збільшення товщини герметизуючих полімерних оболонок, було запропоновано використати для цієї мети металополімерні герметизуючі шари, які утворюють навколо п'єзокерамічного активного елемента замкнуту оболонку.

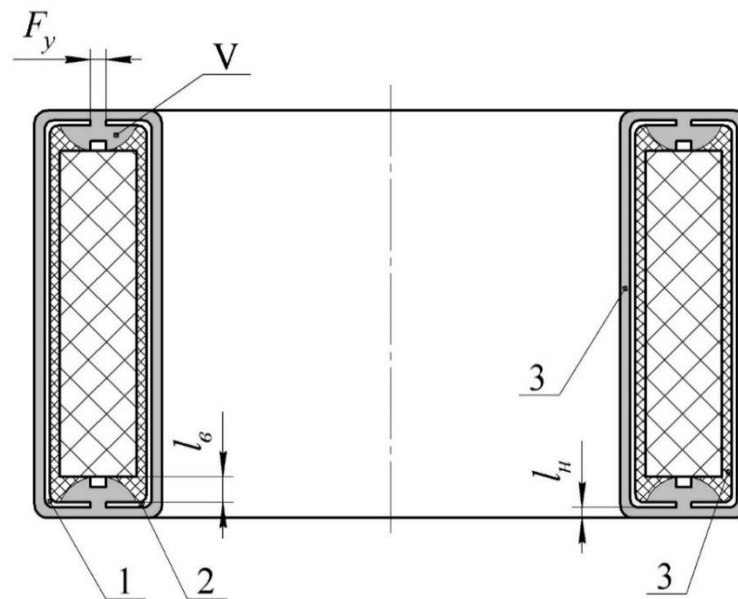
На рис. 4.18 представлені конструкції гідроакустичних приладів, герметизовані гумо-металевими шарами (а) та шарами з епоксидного компаунду, в товщі якого знаходиться гофрована металева фольга (б). Між частинами металевих оболонок є зазори F_y , обумовлені технологічними особливостями виготовлення метало-полімерних оболонок.

При герметизації гумометалевими шарами (рис. 4.18, а) зовнішній і внутрішній металеві бандажі (1 і 2) мають однаковий розмір по висоті. Бандажі встановлюються по висоті з точністю, яка дозволяє забезпечити між ними і торцевими металевими кільцями зазор $F_y \leq 0,1 \div 0,3$ мм. Цей зазор обмежує дифузійне зволоження внутрішнього об'єму полімерного матеріалу. Внутрішній об'єм, що зволожується, містить епоксидний компаунд (6) та торцеві елементи гумових чохлів (3 та 4). Торці випромінювача захищені гумовими манжетами (7).

Герметизуючі елементи випромінювачів (рис. 4.18, б), які містять епоксидний компаунд (3) і металеву фольгу, складаються із зовнішньої (1) і внутрішньої (2) частин гофрованої металевої оболонки із фольги, яка має форму порожнистого тороїда овального перерізу, та морозостійкого компаунду УП-592-11. Зазор між частинами металевої оболонки вибирається із умови заповнення внутрішнього об'єму епоксидним компаундом і знаходиться в межах 0,4...0,6 мм.



a



б



– зволожений полімерний матеріал

Рис. 4.18. Конструкції гідроакустичних приладів, герметизовані гумо-металевими шарами (*a*) та шарами з епоксидного компаунду (*б*)

Процес зволоження конструкцій приладів характеризується часовими змінами концентрації вологи в електроізоляційних шарах, які прилягають до активного елемента. Проходження вологи через органічний матеріал, який розділяє два напівпростори з різною концентрацією парів рідини, слід розглядати [4, 133, 134] послідовно як сорбцію дифундованої речовини полімерним матеріалом, дифузію розчиненої речовини в напрямі найменшої концентрації і десорбцію її на стороні низької концентрації. Забезпечення довговічності конструкцій гідроакустичних приладів відносно герметизації та електричної міцності полягає в досягненні умови $t_e \leq t_{e.з.}$, де t_e – тривалість експлуатації, $t_{e.з.}$ – час ефективного вологозахисту, протягом якого через герметизуючу оболонку пройде деяка критична для електроізоляції кількість вологи. Розрахунок цієї критичної кількості вологи Q може здійснюватись, як вже відмічалось, в припущенні того, що стан потоку парів рідини має дві складові: нестационарну і стаціонарну. Рівняння дифузії описує також нестационарний стан потоку парів рідини і найточніше описує процес проходження вологи крізь полімерну ізоляцію у внутрішній об'єм конструкції, який має сорбцію, що мало відрізняється від нуля.

Рівняння

$$dQ = PF_y \frac{dp}{dx} dt, \quad (4.24)$$

де P – стала вологопроникливості, відноситься до стаціонарного стану потоків парів рідини і дозволяє визначити кількість рідини Q , яка пройшла через шар органічного матеріалу x за час t через площу F_y при різниці тисків по обидві сторони шару p .

Згідно закону Генрі, область застосування якого поширюється і на полімери, кількість вологи, поглиненої внутрішнім об'ємом V визначається рівнянням

$$dQ = h V dp, \quad (4.25)$$

де h – коефіцієнт розчинності.

Рівняння (4.24) може бути записане наступним чином

$$dQ = PF_y \frac{(p_0 - p_k)}{l_\epsilon} dt, \quad (4.26)$$

де p_k – критичний тиск парів рідини у внутрішньому об'ємі; p_0 – тиск парів рідини, які насичують простір; l_ϵ – товщина шару внутрішнього об'єму полімерного матеріалу.

Якщо припустити, що пари рідини, які пройшли крізь оболонку, будуть повністю поглинатися внутрішнім полімерним матеріалом, то праві частини рівнянь (4.25) і (4.26) можливо прирівняти. При цьому одержимо вираз

$$h V dp = PF_y \frac{(p_0 - p_k)}{l_\epsilon} dt,$$

після інтегрування якого одержимо розрахункову формулу наступного вигляду:

$$t = \frac{h V l_\epsilon}{PF_y} \ln \left(\frac{p_0}{p_0 - p_k} \right). \quad (4.27)$$

Таким чином, при оцінці часу вологозахисту елементів, зволоження яких здійснюється через перемички із полімерного матеріалу, які розміщуються між металевими непроникливими деталями, зволожуючий потік характеризується нестационарною і стаціонарною стадіями зволоження.

Початкова (нестационарна) стадія, яка є сорбцією вологи зовнішньою оболонкою, описується рівнянням дифузії і складає для оболонок товщиною 2...3 мм із компаунду і гуми 8...10 % часу від розрахованого за формулою (4.27). Ця величина враховується виразом, $t_1 = \frac{l_n^2}{6D}$, де l_n – товщина зовнішньої полімерної оболонки.

Стаціонарна стадія зволоження, яка являє собою поглинання парів рідини внутрішнім полімерним матеріалом, має місце в тому випадку, коли час встановлення рівноваги у внутрішньому об'ємі конструкції гідроакустичного приладу після надходження чергової кількості вологи малий порівняно з часом, протягом якого здійснюється надходження цієї вологи.

Загальний час вологозахисту конструкції приладу становить

$$t_{\text{в.з.}} = t_1 + t = \frac{l_h^2}{6D} + \frac{h V l_{\text{в}}}{P F_y} \ln \left(\frac{p_0}{p_0 - p_k} \right) \quad (4.28)$$

Серед труднощів, які мають місце при оцінці часу ефективного вологозахисту, слід виділити визначення ефективної площі дифузії рідини крізь зазори оболонки зі складними крайовими умовами та уточнення вологоємності внутрішнього об'єму. Вплив ефективної площі дифузії в залежності від товщини металевих деталей і особливостей крайових ефектів у формулі (4.28) може бути врахований за допомогою коефіцієнта K_F . Експериментально встановлено, що для варіанта конструкції гідроакустичного приладу, зображеного на рис. 4.18, а, при товщині металевих деталей від 0,5 до 1 мм $K_{F1} = 3$, а для варіанта конструкції рис. 4.18, б при товщині металевої оболонки від 0,2 до 0,3 мм $K_{F1} = 2,5$.

При оцінці вологоємності внутрішнього об'єму досить важливим є визначення його величини, яка залежить від взаємного розміщення зазорів між металевими деталями оболонки і струмоведучими частинами активного елемента. Вводиться припущення, що концентрація вологи в елементарних внутрішніх об'ємах полімерного матеріалу, які рівновіддалені від зазорів між металевими деталями, однакова. Слід очікувати, що різке зниження опору ізоляції конструкції гідроакустичного приладу настане в той момент, коли тиск парів рідини в елементарних об'ємах органічного матеріалу, які знаходяться біля струмоведучих частин активного елемента, досягне критичного значення.

Наприклад, критичний тиск парів p_k води при відносній вологості 80 % і температурі 283 К становить 3,7 мм ртутного стовпчика.

Об'єм зволоженого полімерного матеріалу становить:

а) при герметизації гумо-металевими шарами $V = \frac{\pi l_e^2}{4}$;

б) при герметизації епоксидним компаундом і металевою фольгою $V = \frac{\pi l_e^2}{2}$

Таким чином, співвідношення (4.28) для оцінки ефективного часу вологозахисту конструкцій гідроакустичних приладів з врахуванням впливу крайових умов та об'єму зволоженого матеріалу у внутрішній порожнині приймає вигляд:

а) при герметизації гумометалевими шарами

$$t_{e.z.} = \frac{l_n^2}{6D} + 0,4 \frac{\pi h l_e^3}{PF_y K_{F1}} ; \quad (4.29)$$

б) при герметизації епоксидним компаундом і металевою фольгою

$$t_{e.z.} = \frac{l_n^2}{6D} + 0,8 \frac{\pi h l_e^3}{PF_y K_{F2}} . \quad (4.30)$$

Зауважимо, що основні характеристики вологості полімерних матеріалів, які можуть бути рекомендовані для герметизації конструкцій електроакустичних приладів, наведені в табл. 4.5.

Розрахунки, виконані за формулами (4.29) і (4.30), показали, що ефективний час вологозахисту а відтак, і заданої величини електричної міцності конструкції гідроакустичного приладу, можливо забезпечити відповідно до 12 років і 8 років.

Висновки до розділу 4

Визначені фізичні причини зменшення електричної міцності конструкцій гідроакустичних приладів.

Показано, що в випромінюючих гідроакустичних приладах електрична міцність конструкцій визначається опором електричних втрат в елементах електроізоляції і герметизації $R_{el} = 1 / \omega C \operatorname{tg} \delta$, де C і $\operatorname{tg} \delta$ – ємність і тангенс кута діелектричних втрат елементів герметизації і електроізоляції активного елемента. Встановлені три паралельно з'єднані складові електричного опору конструкцій електроакустичних приладів. До них віднесені: опір електричних втрат активного елемента; опір електричних втрат в елементах електроізоляції і герметизації конструкції.

Зазначено, що у конструкціях випромінюючих електроакустичних приладів збуджуються електричні поля достатньо великої напруженості, що створює можливості пробою використаних в конструкціях п'єзокерамічних і електроізоляційних матеріалів. Визначені умови підтримки необхідного рівня електричної міцності конструкцій.

Проведено аналіз електричної міцності конструкцій гідроакустичних приладів, обумовленої дією зволоженості їх п'єзокерамічних елементів і електричної ізоляції. Вона обумовлює зменшення опору міжелектродної ізоляції, що приводить до виникнення часткових розрядів небезпечної інтенсивності між електродами. Встановлені необхідні умови щодо забезпечення електричної міцності, опору, тангенсу кута діелектричних втрат і провідності матеріалів конструкції, які забезпечуються необхідним рівнем вологості ізоляції в конструкції.

Проаналізовані фізичні причини, що обумовлюють необхідність герметизації конструкцій гідроакустичних приладів. До них відносяться: адсорбція молекул рідини на поверхні герметизуючої оболонки; дифузія молекул

рідини крізь герметизуючу оболонку; сорбція молекул рідини матеріалом герметизуючої оболонки, елементами внутрішнього об'єму конструкції та самою конструкцією.

Виявлені фізичні процеси, що характеризують адсорбцію молекул рідини матеріалом герметизуючої оболонки конструкції приладу.

Запропонований підхід до розрахунків вологості п'єзокераміки в конструкціях гідроакустичних приладів. Встановлені кількісно позитивні моменти від покриття лаком конструкцій п'єзокерамічних елементів та запропонований підхід до кількісного визначення ємності шару адсорбованої рідини на поверхні цієї конструкції.

Запропонований підхід до розрахунків дифузії рідини крізь елементи герметизації конструкцій гідроакустичних приладів. Встановлені чинники, якими визначається вологопроникність герметизуючої оболонки конструкції гідроакустичного приладу і регулюється час запізнення встановлення стаціонарного потоку дифузії через цю оболонку.

Розглянуті найпоширеніші варіанти конструктивного виконання герметизації гідроакустичних приладів і запропоновані методики визначення часу роботи цих приладів з необхідною ефективністю відносно електричної міцності.

Розроблені і апробовані методи розрахунків концентрації парів рідини в конструкціях гідроакустичних приладів різних типів: силових, розвантажених і компенсованих. Встановлено, що основою всіх цих розрахунків є знання кількісних значень характеристик вологості конструкційних матеріалів – коефіцієнтів дифузії, проникливості та поглинання. Для деяких конструкційних матеріалів наведені конкретні чисельні дані.

Запропонована послідовність конструювання вузлів герметизації з використанням розробленого розрахункового забезпечення.

РОЗДІЛ 5

МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКІВ ТЕПЛОВОЇ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ПІДВОДНИХ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИХ ПРИЛАДІВ

В даному розділі викладені дослідження щодо розрахункового забезпечення конструювання гідроакустичних приладів з метою забезпечення їх нормального теплового режиму роботи. При цьому використані два підходи – аналітичний та моделювання. Перший дозволяє отримати аналітичні співвідношення для отримання кількісних значень теплових полів конструкцій, другий використовує пряме моделювання за допомогою комп'ютерних програм. Особливістю першого підходу є можливість більшого фізичного розуміння процесів, що протікають, другого – більша складність досліджуваних моделей.

5.1. Теплові навантаження конструкцій випромінюючих гідроакустичних п'єзокерамічних приладів

Особливістю роботи ПЕП є нагрівання їх конструкцій внаслідок виділення тепла в активних елементах, виготовлених з п'єзокераміки [3-6, 81, 135-145]. Причиною розігріву є механічні та електричні втрати в матеріалах активних елементів. Внутрішній розігрів приладів призводить до негативних наслідків, зокрема:

- деполяризації п'єзокераміки при перевищенні температури Кюрі;
- зміни параметрів п'єзоелектричних матеріалів та, як наслідок, зміни електроакустичних характеристик приладів (резонансної частоти, ємності, опору тощо)
- виникнення механічних напружень, які можуть призвести до руйнування приладів, оскільки в конструкціях гідроакустичних

приладів має місце жорстке з'єднання матеріалів з різними коефіцієнтами температурного лінійного розширення.

При інтенсивній роботі в режимі випромінювання електроакустичного приладу виникає імовірність перегрівання його конструктивних елементів, що може призвести до виходу його з ладу або руйнування конструктивних елементів, в першу чергу, п'єзокераміки.

При підвищенні температури п'єзокераміки електромеханічні властивості п'єзокераміки змінюються, що призводить до змін характеристики приладів. Якщо температура не надто висока, зміни властивостей п'єзокераміки є оборотними; в протилежному випадку зміна властивостей буде остаточною (рис. 5.1).

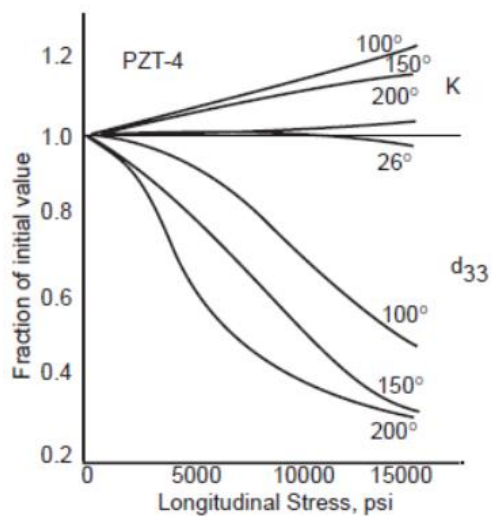


Рис. 5.1. Вплив напружень та температури на k і d_{33} для п'єзокераміки PZT-4 [146]

Для уникнення нагрівання часто виникає задача змінити конструкцію приладу або застосовувати пристрої, що контролюють температуру.

Останніми десятиліттями в техніці складається тенденція до зростання потужностей та функціональних можливостей приладів з одночасним

зменшенням їх маси та габаритів, тому забезпечення нормального теплового режиму роботи приладів, набуває особливої актуальності.

Температура розігріву конструкції випромінюючого приладу залежить від кількості виділеного в ньому тепла, яка в свою чергу залежить від випромінюваної потужності та коефіцієнта корисної дії ПЕП, і ефективності схеми тепловідводу конструкції. Відповідно проектування та конструкторська реалізація високопродуктивних гідроакустичних п'єзокерамічних приладів з ефективною системою тепловідведення є досить складним інженерно-науковим завданням.

Нагрівання перетворювачів відбувається завдяки наступним фізичним причинам: тепловиділення, обумовлене внутрішніми механічними втратами в п'єзокераміці; діелектричні втрати в п'єзокераміці; нагрівання п'єзокерамічних елементів внаслідок протікання через них електричного струму; перенесення тепла від зовнішньої поверхні конструкції внаслідок нагрівання робочого середовища.

Безпечна робоча температура п'єзокераміки є важливим аспектом, який обумовлює необхідність досліджень теплових полів приладу. Вона зазвичай є меншою за робочу температуру, вказану в документації на п'єзокерамічні елементи і становить половину від зазначеної в ній температури Кюрі. Попередні стискуючі армування, накладені на прилад, та утворені внаслідок цього механічні напруження можуть також призвести до так званої механічної деполяризації, яка полягає у збільшенні механічних втрат, і, відповідно, підвищеного нагрівання цих приладів.

Серед гідроакустичних приладів як випромінювачі та приймачі звукових хвиль широко застосовуються стержневі конструкції, або, як їх ще називають, перетворювачі Ланжевена [3-6, 81, 142, 147-151]. Особливістю цих приладів є поєднання п'єзоелементів з металевими пасивними накладками, що дозволяє здійснювати їх армування, зокрема за допомогою центральноболтової стяжки.

Зазначена конструкція є доволі надійною і має ряд переваг перед клейовими з'єднаннями, оскільки відсутні ізолюючі шари, які збільшують ємність п'єзокерамічного приладу. Зручним також є електричне підключення завдяки використанню металевих пластинок-електродів. З точки зору забезпечення нормального теплового режиму роботи електроакустичного приладу, конструкція перетворювача Ланжевена забезпечує передачу тепла пасивним металевим накладкам, що є його суттєвою перевагою та дозволяє реалізовувати різні варіанти систем охолодження таких конструкцій.

Від типу коливальної системи конструкції гідроакустичного приладу також суттєво залежить питання забезпечення його теплового режиму роботи. Якщо порівнювати стержневі та циліндричні конструкції, то нагрівання циліндричних приладів є меншим, ніж стержневих, оскільки активний елемент циліндричних приладів має більшу площу контакту з оточуючим середовищем, куди здійснюється відведення тепла. В той же час, в стержневих конструкціях приладів завдяки армуванню охолодження можливо реалізувати шляхом забезпечення ефективної передачі тепла від п'єзокераміки до металевих елементів конструкції.

Деякі з причин нагрівання приладів можливо коригувати, обираючи відповідний тип складу п'єзокераміки, матеріали накладок та спосіб їх з'єднання.

Основні наслідки, до яких призводить нагрівання конструкцій приладів.

1. *Пошкодження конструкцій ПЕП* може відбутись при виникненні температурних механічних напружень та порушенні цілісності п'єзокерамічних активних елементів внаслідок цього. Така ситуація виникає по причині нерівномірного розподілу температур при різкому локального розігріві чи охолодженні (наявності температурного перепаду), різних температурних коефіцієнтів лінійного розширення компонентів у композитних матеріалах, обмеженого місця для розширення [3, 4].

2. *Деполаризація активних елементів* виникає, коли температура їх розігріву перевищує деяку критичну межу – температуру Кюрі. При досягненні цієї температури відбувається хаотична переорієнтація електричних моментів диполів і п'єзокераміка втрачає явище п'єзоефекту. Для більшості сучасних п'єзокерамічних матеріалів ця температура становить 200 – 300 °С. Хоча в теперішній є нові п'єзокерамічні матеріали (наприклад, PZT-5A, рТ-71, APC-851), для яких температура Кюрі перевищує 350 °С та навіть 600 °С (ТНаВ-1). Однак для ряду існуючих п'єзокерамічних матеріалів (наприклад, ТБ-1, ТБК-3, ЦТБС-3,) ця температура знаходиться в межах біля 100 °С. В той же час максимальна робоча температура п'єзокераміки має бути меншою від температури Кюрі на 30 – 40 % [4].

3. Оскільки при паянні для якомога меншого нагрівання активних елементів використовують припої з низькою температурою плавлення, то розігрів конструкцій ПЕП може призвести до *порушення цілісності паяного монтажу* та виходу приладу з ладу внаслідок порушення його електричного кола.

4. Для більшості полімерних матеріалів температура розігріву не повинна перевищувати 60 °С. Тому при розігріві можлива *втрата ізоляційних властивостей герметизуючими матеріалами*.

5. До наслідків нагрівання конструкцій ПЕП також слід віднести *залежність параметрів п'єзокерамічних матеріалів від температури*, а саме: п'єзомодулів; діелектричної проникності; коефіцієнту електромеханічного зв'язку; швидкості звуку; тангенса кута діелектричних втрат [146]. Температурна зміна параметрів п'єзокераміки призводить до зміни електроакустичних характеристик приладів.

Таким чином, розігрів конструкцій гідроакустичних приладів під час їх експлуатації носить негативний характер і особливу небезпеку становить їх механічне руйнування.

Основними задачами забезпечення теплового режиму роботи конструкцій є:

- виявлення причин виникнення теплових навантажень в конструкціях ПЕП як на етапі виготовлення, так і під час експлуатації для вжиття можливих заходів щодо нейтралізації цих причин;

- розроблення методик розрахунків температур розігріву конструкцій ПЕП, за допомогою яких можливо буде визначити температуру в будь якій точці об'єму приладу в будь який момент часу, проведення розрахунків за розробленою методикою, кількісна оцінка ефективності реалізації тих чи інших варіантів зменшення тепловиділення або відводу тепла;

- розроблення методик визначення теплових навантажень, що створюються в елементах конструкцій ПЕП, розрахунок кількісних величин цих навантажень та вироблення рекомендацій щодо їх зменшення.

Основні моменти, які варто враховувати під час конструювання гідроакустичних п'єзокерамічних приладів з урахуванням теплових навантажень, такі:

1. Вибрати п'єзокерамічний матеріал, який має стабільні властивості при зміні температури. Деякі п'єзокерамічні матеріали можуть втрачати свою п'єзоелектричну ефективність при певних температурах.

2. Використовуючи програми для моделювання теплопровідності та теплового розширення, можна передбачити, як тепло буде розподілятися в конструкціях приладів при різних температурах.

3. Важливо розробити конструкцію приладу таким чином, щоб тепло, яке утворюється внаслідок його роботи, могло ефективно відводитися.

4. Після конструювання важливо провести тестування приладу при різних температурах, щоб впевнитися, що він працює ефективно та має стабільні властивості.

5. Деякі додаткові системи можуть бути встановлені для контролю температури приладу під час його роботи. Це допоможе уникнути перегріву та забезпечити стабільну продуктивність.

5.2. Методи розрахункової оцінки температури розігріву конструкцій електроакустичних приладів.

Слід розрізняти методи визначення самого теплового поля і методи визначення специфічних властивостей, необхідних для розуміння теплових процесів. Наприклад, методи включають порівняння коефіцієнтів теплопровідності або теплопередачі в середовищі, щоб оцінити приблизний вплив підвищення температури, втрат потужності, щільності теплового потоку під впливом теплового навантаження. Однак, якщо потрібно оцінити весь тепловий образ конструкції приладу, необхідно вирішити задачу знаходження теплового поля при заданих граничних і початкових умовах розв'язавши диференціальне рівняння теплопровідності Фур'є. [140-144, 153]

Роботу конструкції п'єзокерамічного електроакустичного приладу з погляду математики можливо описати двома методами: *методом зв'язаних полів* та *методом електромеханічних аналогій*. Перший метод є суто математичним підходом, тоді як другий – напівемпіричним.

Основним законом теплопровідності є гіпотеза запропонована Фур'є щодо пропорційності теплового потоку температурному градієнту. Відповідно до гіпотези Фур'є тепловий потік dQ , що проходить через площу ізотермічної поверхні dF за час $d\tau$ визначається виразом [153]:

$$d^2Q = -\lambda_T \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) dF \cdot d\tau, \quad (5.1)$$

де λ_T - коефіцієнт теплопровідності, фізичний параметр, який характеризує здатність речовини проводити теплоту, і чим він більший, тим краще речовина проводить теплоту. Його величина залежить від типу матеріалу, а також від температури, вологості, густини та інших чинників. Градієнт температури $\partial t / \partial n$ – це вектор, який направлений по нормалі до ізотермічної поверхні, він направлений в бік зростання температури і характеризує саме максимальну швидкість зміни температури. Вектор градієнта температур можна розкласти в проекції осі координат.

Знак мінус свідчить про протилежний напрямок векторів: вектор градієнта температур спрямований у бік збільшення температури, а вектор теплового потоку – у бік зменшення температури.

Поділимо обидві частини виразу (5.1) на $dF \cdot d\tau$, та отримаємо вираз для густини теплового потоку:

$$q = -\lambda_T \frac{\partial t}{\partial n}. \quad (5.2)$$

Рівняння теплопровідності, що виведено на основі закону збереження енергії має вигляд:

$$\lambda_T \nabla^2 T + q_v = C_T \rho \frac{dT}{dt}, \quad (5.3)$$

де λ_T – коефіцієнт теплопровідності тіла, ∇^2 – оператор Лапласа, q_v – об'ємна потужність джерел тепловиділення, T – температура, ρ – густина тіла, C_T – питома теплоємність тіла, t – час.

Для стаціонарного випадку, права частина рівності (5.3) дорівнює нулю:

$$\lambda_T \nabla^2 T + q_v = 0, \quad (5.4)$$

Результуюче диференціальне рівняння теплопровідності для стаціонарного теплового поля в загальному випадку матиме наступний вигляд:

$$\nabla^2 T + \frac{q_v}{\lambda_T} = 0. \quad (5.5)$$

Дане рівняння описує теплове поле одного зразка матеріалу. Різні зразки об'єднуються один з одним і характеризуються умовами однозначності. Рівняння теплопровідності може бути застосоване до плоских та циліндричних стінок і виробів неправильної геометрії а також для вирішенні одновимірних, двовимірних і тривимірних задач.

Умови однозначності для задач знаходження теплових полів

Рівняння теплопровідності справедливе в загальному випадку для будь-якого теплового процесу. Для того, щоб виокремити необхідний процес теплопередачі, який потрібно знайти, необхідно доповнити його певними умовами. Умови однозначності мають на меті виділити серед безлічі теплових процесів саме ті, що відповідають розглядуваній задачі.

Умовами однозначності є [153]:

- 1) Геометричні умови – визначають форму та геометричні розміри об'єкта;
- 2) Фізичні умови - фізичні характеристики об'єкта та оточуючого середовища;
- 3) Часові умови - визначають початковий тепловий стан об'єкта та його зміну в часі (їх необхідно задавати лише при дослідженні нестационарного режиму теплопровідності);
- 4) Граничні умови - визначають взаємодію об'єкту, що розглядається, з навколишнім середовищем і можливо можуть бути описані трьома різними способами:

1. граничні умови першого роду. Відомий розподіл температури на границях об'єкту та середовища в кожен момент часу;
2. граничні умови другого роду. Відомий тепловий потік на границях об'єкту та середовища в кожен момент часу, а також одна температура;
3. граничні умови третього роду. Відома температура оточуючого середовища та закон теплообміну між ним і об'єктом (коефіцієнт тепловіддачі).

Диференціальне рівняння енергії та умови однозначності є повною математичною моделлю певної задачі теплопровідності.

5.3. Визначення теплового поля конструкцій ПЕП аналітичними методами

Визначити теплове поле довільних конструкцій гідроакустичних приладів є складною задачею, оскільки їх сучасні конструкції містять ряд герметизуючих та ізолюючих шарів. До того ж, на прилади під час експлуатації діють багато випадкових факторів – температура оточуючого середовища, ефективність тепловідводу, зовнішній тиск, час експлуатації приладу тощо. На даний час досліджені загальні методики розрахунків теплових полів конструкцій ПЕП [4]. Існують методики знаходження теплових полів конструкцій циліндричних компенсованих ПЕП, теплові навантаження в конструкціях ПЕП, герметизованих гумо-металевими шарами та епоксидними компаундами. Однак не дослідженими є теплові поля циліндричних ПЕП силових конструкцій. Останнім часом проводиться проектування циліндричних приладів які в своєму внутрішньому об'ємі містять додаткові конструктивні елементи. Тому процедуру визначення теплового поля наведемо на прикладі циліндричних конструкцій компенсованого типу, заповнених електроізоляційною рідиною та герметизованих металевими оболонками [145], силового типу [139], герметизованих метало-поліметними

оболонками [138], а також стержневого приладу типу Ланжевена [140-142]. В якості гідроакустичних приладів розглянемо ряд конструкцій перетворювачів-випромінювачів.

5.3.1. Постановка задачі для циліндричного приладу, умови однозначності, результати знаходження теплового поля

Аналітичні розрахунки теплових полів циліндричних ПЕП (рис. 5.2) суттєво відрізняються між собою в залежності від кількості шарів матеріалів, задіяних в конструкції ПЕП. Для конструкцій компенсованого типу, герметизованих метало-полімерними шарами, теплове поле буде симетричним відносно середини активного елементу. Тому в розрахунках фігурують 3 рівняння теплопровідності, а однією з граничних умов є симетричність теплового поля [153].



Рис. 5.2 П'єзокерамічні електроакустичні прилади циліндричного типу

Визначимо теплові поля декількох конструкцій циліндричних приладів.

1) Компенсована конструкція.

Можливим варіантом стабілізації зовнішнього гідростатичного тиску є конструкція, заповнена електроізоляційною рідиною (наприклад, трансформаторною оливою) і герметично закрита металевою оболонкою. Така компенсована конструкція включає активні елементи, кріплення, корпус,

електричні ізолятори, армуючі елементи та струмопровідні кабелі. Активний елемент може бути герметизований метало-полімерними оболонками. Армований активний елемент поміщається в звукопрозорому корпусі, який заповнюється електроізоляційною рідиною. Активний елемент кріпиться до корпусу за допомогою гумових ущільнювачів. Перетворювач кріпиться до екрану і поверхні антени за допомогою спеціальної конструкції. Перевагами рідинонаповнених конструкцій є висока електрична міцність, простота обслуговування і незалежність параметрів від гідростатичного тиску. Недоліки – складність виготовлення і зниження ефективності через додаткові механічні втрати в ізоляційній рідині.

Для переходу до фізичної моделі даного перетворювача, спростимо конструкцію до найбільш важливих компонентів, які є визначальними для визначення теплових полів. Конструкція циліндричного перетворювача, заповнена рідиною та його фізична модель наведена на рис. 5.3. Його конструкція: активний елемент 3, який знаходиться в металевому звукопрозорому корпусі; 1 та 5 – відповідно зовнішня та внутрішня металеві оболонки корпусу; полімерний матеріал 2, який знаходиться зовні між п'єзоелементом та металевою оболонкою та виконує роль електроізоляції; шар електроізоляційної рідини 4 зсередини між корпусом та активним елементом.

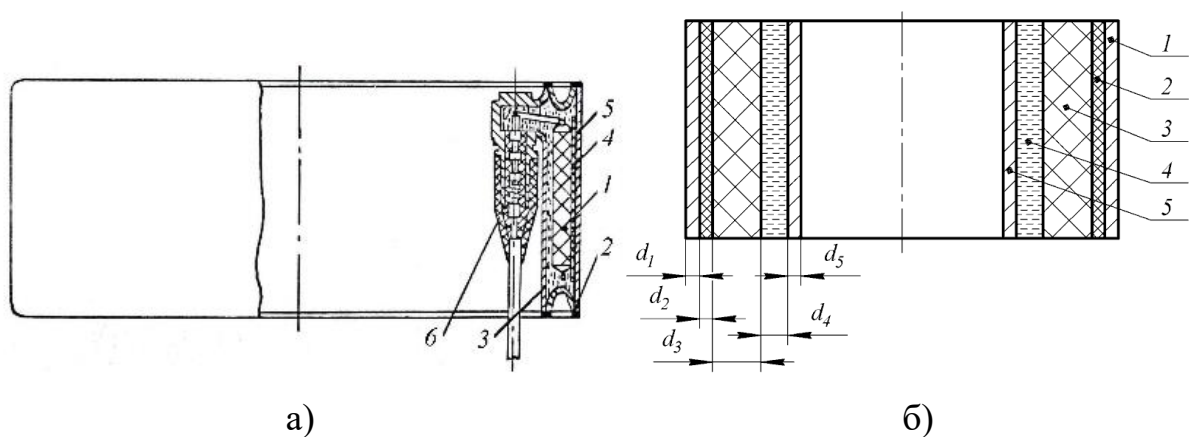


Рис. 5.3. Конструкція а) та спрощена фізична модель б) циліндричного компенсованого рідиннозаповненого перетворювача

Якщо відношення радіусів зовнішньої і внутрішньої циліндричних поверхонь ≤ 1.4 , то з похибкою, меншою за 10 %, теплове поле нескінченного циліндра еквівалентне полю пластини [153]. Оскільки наведені вище умови завжди виконуються для циліндричних перетворювачів, то в якості розрахункової моделі теплового поля такого ПЕП можна використати теплове поле нескінченної пластини з тими ж граничними умовами і розмірами.

Для ілюстрації застосування запропонованої методики використано конкретний приклад знаходження теплових полів циліндричного приладу. Наведені нижче параметри є найбільш типовими для перетворювачів такого типу, але не стосуються конкретного виробу.

Умови однозначності для циліндричного перетворювача:

1) геометричні умови:

Внутрішній радіус циліндричного перетворювача 70 мм, товщини внутрішнього та зовнішнього шарів корпусу $d_1 = d_5 = 1,5$ мм, електроізоляційний шар товщиною $d_2 = 1$ мм, шар рідини $d_4 = 3$ мм, активний елемент товщиною $d_3 = 8$ мм.

2) фізичні умови:

- шар 1 – титановий сплав ВТ1-0, $\lambda_{T1} = 16$ Вт/(м·К);
- шар 2 – ізоляційний матеріал АГ-4С, $\lambda_{T2} = 0,315$ Вт/(м·К);
- шар 3 – п'єзокерамічний елемент АРС-840, мм, $\lambda_{T3} = 1,9$ Вт/(м·К), густина теплового потоку $q_{V3} = 330 \cdot 10^3$ Вт/м³;
- шар 4 – трансформаторна олива ТКп, $\lambda_{T4} = 0,11$ Вт/(м·К);
- шар 5 – титановий сплав ВТ1-0, $\lambda_{T4} = 0,11$ Вт/(м·К);

Перетворювач занурений у воду, температура оточуючого середовища 20°C.

3) часові умови:

Аналізується стаціонарний тепловий режим.

4) граничні умови:

Коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої та внутрішньої стінок $\alpha_{T1} = \alpha_{T5} = 350$ Вт/(м²·К) (взяте орієнтовне значення для тепловіддачі пари «метал – спокійна вода»). Задаються три різновиди граничних умов:

- рівність температур поперхонь в точках контакту шарів (температура на границі контактів компонентів перетворювача і температура на поверхні корпусу, що контактує з оточуючим середовищем);
- тепловий потік на границі перетворювача, яка межує з оточуючим середовищем;
- рівність теплового потоку на границях шарів (тепловий потік поширюється в напрямку від активного елемента - назовні, тобто з середнього шару перетворювача, в обидві напрямки).

У роботі [145] наведено розрахунки теплового поля герметичного закритого циліндричного п'єзокерамічного електроакустичного перетворювача компенсованої конструкції. Конструкція має п'ять шарів матеріалу, один з яких є активним п'єзокерамічним шаром, розташованим між полімерним електроізоляційним матеріалом і металевим корпусом. Циліндричний перетворювач, герметизований шарами металу та полімерів, має теплове поле, симетричне відносно середини активного елемента. Задача знаходження теплового поля розв'язувалася з використанням трьох рівнянь теплопровідності і семи граничних умов (рівність теплового потоку на межі шару і на межі з середовищем, рівність температури між точками контакту шарів і поверхнею перетворювача, умови симетрії теплового поля відносно центру п'єзоелектричного тіла) для кожного шару структури. В роботі [3] два пасивних шари були замінені шаром із загальним термічним опором, що дозволило вирішити цю проблему і спростити конструкцію до трьох симетричних відносно п'єзокераміки шарів. Такий підхід не дозволяє знайти розподіл температур для

всіх шарів перетворювача. В [145] показано графік розподілу теплового поля для симетричної структури з п'ятьма шарами матеріалу, де можна побачити значне падіння температури в полімерному шарі.

Для знаходження теплового поля асиметричної конструкції герметизованого циліндричного приладу, заповненого рідиною, необхідно розв'язати п'ять рівнянь теплопровідності, записаних для кожного шару. На відміну від попередніх досліджень, у цій конструкції електроізоляційні шари не є ідентичними (шар електроізоляційного матеріалу і рідина, яка також виконує роль ізоляційного шару), а відрізняються за товщиною і коефіцієнтом теплопровідності. Розв'язок задачі про теплове поле і її для циліндричного перетворювача компенсованої рідинно-заповненої структури можна знайти в роботі [143].

Для знаходження розв'язку задачі теплопровідності зазначеного циліндричного приладу замінимо його складові елементи шарами, товщина яких відповідає товщині цих елементів в конструкції. Фізична модель перетворювача для розрахунку теплового поля представлена у вигляді системи з п'яти нескінченних по висоті шарів, різної товщини, кожен з яких характеризується своїми коефіцієнтами теплопровідності (рис. 5.4). Зовнішні герметизуючі шари 1, 2 з титану та полімерного матеріалу, мають товщину відповідно d_1 і d_2 ; 3 – п'єзокерамічний активний елемент з товщиною d_3 ; 4 – електроізоляційна рідина, товщиною d_4 ; 5 – внутрішній шар герметизації з титану, товщиною d_5 . Коефіцієнти тепловіддачі поверхонь перетворювача відповідно α_{T1} (зовнішньої поверхні) та α_{T5} (внутрішньої поверхні). Виділення тепла відбувається в активному п'єзокерамічному елементі, а величина тепловиділення задана у вигляді об'ємної потужності джерел q_{V3} .

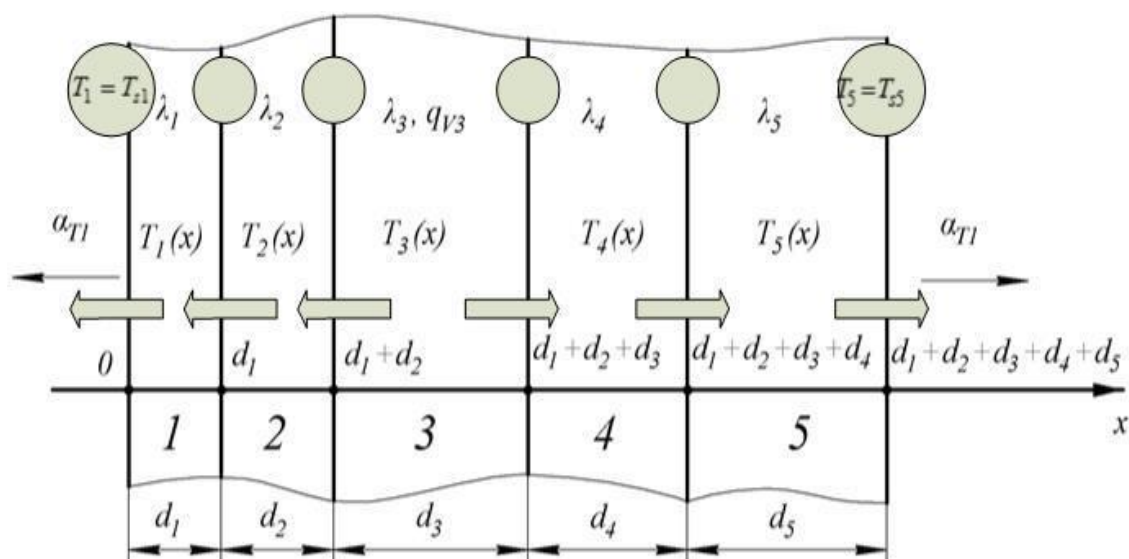


Рис. 5.4. Розрахункова модель циліндричного перетворювача, що розглядається

Запишемо рівняння теплопровідності для кожного шару для зазначених елементів конструкції циліндричного перетворювача.

Для шару 1 (зовнішня герметизація, титан):

$$0 < x \leq d_1;$$

$$T_1(x) = C_1 x + C_2;$$

Для шару 2 (зовнішня герметизація, полімер):

$$d_1 < x \leq d_1 + d_2;$$

$$T_2(x) = C_3(x - d_1) + C_4;$$

Для шару 3 (активний елемент, п'єзокераміка, присутнє тепловиділення):

$$d_1 + d_2 < x \leq d_1 + d_2 + d_3;$$

$$T_3(x) = -\frac{q_{V3}}{2\lambda_{T3}}(x - (d_1 + d_2))^2 + C_5(x - (d_1 + d_2)) + C_6;$$

Для шару 4 (електроізоляційна рідина):

$$d_1 + d_2 + d_3 < x \leq d_1 + d_2 + d_3 + d_4;$$

$$T_4(x) = C_7(x - (d_1 + d_2 + d_3)) + C_8,$$

Для шару 5 (внутрішня герметизація, титан):

$$d_1 + d_2 + d_3 + d_4 < x \leq d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5;$$

$$T_5(x) = C_9 \left(x - (d_1 + d_2 + d_3 + d_4) \right) + C_{10},$$

Для знаходження невідомих величин $C_1..C_{10}$, використаємо граничні умови:

1) Рівність температур в точках контакту шарів між собою:

$$T_1(x) \Big|_{x=d_1} = T_2(x) \Big|_{x=d_1};$$

$$T_2(x) \Big|_{x=d_1+d_2} = T_3(x) \Big|_{x=d_1+d_2};$$

$$T_3(x) \Big|_{x=d_1+d_2+d_3} = T_4(x) \Big|_{x=d_1+d_2+d_3};$$

$$T_4(x) \Big|_{x=d_1+d_2+d_3+d_4} = T_5(x) \Big|_{x=d_1+d_2+d_3+d_4}$$

$$T_1(x) \Big|_{x=0} = T_{S1};$$

$$T_5(x) \Big|_{x=d_1+d_2+d_3+d_4+d_5} = T_{S5}.$$

2) Тепловий потік на межі зовнішнього та внутрішнього шарів в оточуюче середовище:

$$\lambda_{T1} \frac{dT_1(x)}{dx} \Big|_{x=0} = \alpha_{T1} (T_{S1} - T_c);$$

$$-\lambda_{T5} \frac{dT_5(x)}{dx} \Big|_{x=d_1+d_2+d_3+d_4+d_5} = \alpha_{T5} (T_{S5} - T_c);$$

3) Рівність теплового потоку на межі шарів.

$$\lambda_{T1} \frac{dT_1(x)}{dx} \Big|_{x=d_1} = \lambda_{T2} \frac{dT_2(x)}{dx} \Big|_{x=d_1};$$

$$\lambda_{T2} \frac{dT_2(x)}{dx} \Big|_{x=d_1+d_2} = \lambda_{T3} \frac{dT_3(x)}{dx} \Big|_{x=d_1+d_2};$$

$$\lambda_{T3} \frac{dT_3(x)}{dx} \Big|_{x=d_1+d_2+d_3} = \lambda_{T4} \frac{dT_4(x)}{dx} \Big|_{x=d_1+d_2+d_3};$$

$$\lambda_{T4} \frac{dT_4(x)}{dx} \Big|_{x=d_1+d_2+d_3+d_4} = \lambda_{T5} \frac{dT_5(x)}{dx} \Big|_{x=d_1+d_2+d_3+d_4}$$

Підставивши рівняння теплопровідності в граничні умови для кожного з шарів, та зробивши ряд перетворень, одержимо:

$$T_{S1} = \frac{q_{V3} \left(\frac{d_3^2}{2\lambda_{T3}} + \frac{d_3 d_4}{\lambda_{T4}} + \frac{d_3 d_5}{\lambda_{T5}} + \frac{d_3}{\alpha_{T5}} \right)}{\alpha_{T1} \left(\frac{d_1}{\lambda_{T1}} + \frac{d_2}{\lambda_{T2}} + \frac{d_3}{\lambda_{T3}} + \frac{d_4}{\lambda_{T4}} + \frac{d_5}{\lambda_{T5}} + \frac{1}{\alpha_{T4}} \right) + 1} + T_c;$$

$$C_1 = \frac{\alpha_{T1}}{\lambda_{T1}} (T_{S1} - T_c); \quad C_2 = T_{S1}; \quad C_3 = C_1 \frac{\lambda_{T1}}{\lambda_{T2}};$$

$$C_4 = C_1 d_1 + C_2; \quad C_5 = C_1 \frac{\lambda_{T1}}{\lambda_{T3}}; \quad C_6 = C_3 d_2 + C_4;$$

$$C_7 = -\frac{d_3 q_{V3}}{\lambda_{T4}} + C_1 \frac{\lambda_{T1}}{\lambda_{T4}}; \quad C_8 = -\frac{d_3^2 q_{V3}}{2\lambda_{T3}} + C_5 d_3 + C_6; \quad C_9 = -\frac{d_3 q_{V3}}{\lambda_{T5}} + C_1 \frac{\lambda_{T1}}{\lambda_{T5}};$$

$$C_{10} = C_7 d_4 + C_8; \quad T_{S5} = C_9 d_5 + C_{10}.$$

Підставивши чисельні значення в отримані вирази отримаємо наступний розподіл теплового поля в досліджуваному циліндричному перетворювачі (рис.5.5):

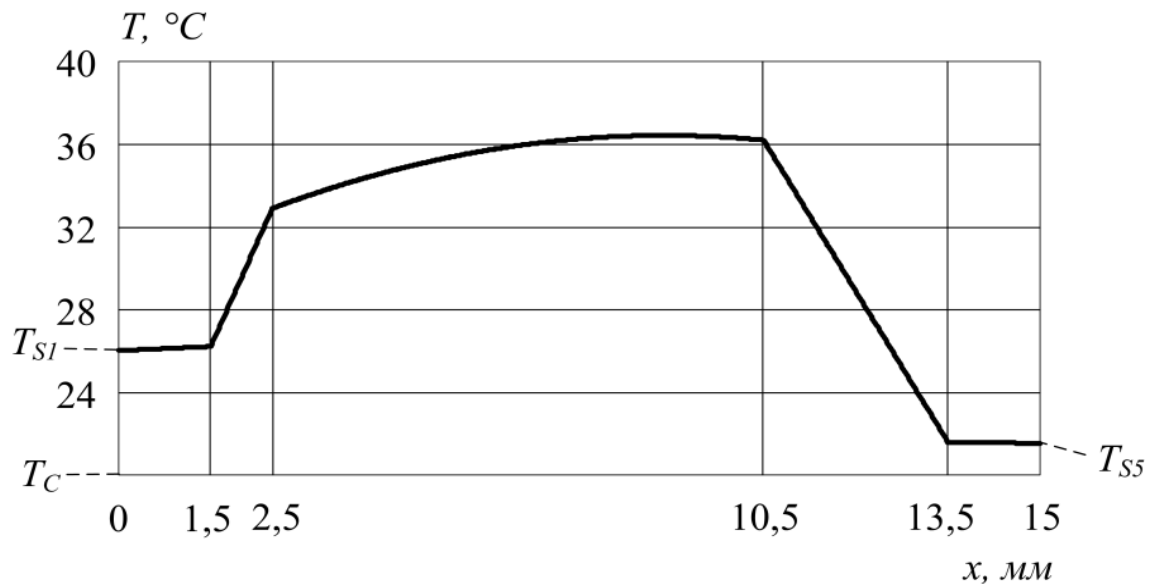


Рис. 5.5. Теплове поле циліндричного п'єзокерамічного перетворювача компенсованої рідиннозаповненої конструкції

При аналізі теплового поля циліндричного перетворювача з компенсаційною рідинною структурою видно, що теплове поле не є симетричним відносно середнього радіуса п'єзoeлемента. Крім того, механічна цілісність перетворювача може бути порушена через великі перепади температур всередині перетворювача та ділянки, де виникають великі термічні напруження. Тому за запропонованою методикою, враховуючи параметри конструкційного матеріалу та геометричні розміри компонентів, можна розрахувати теплове поле сучасних компенсованих рідинно-наповнених циліндричних конструкцій перетворювачів.

2) Силова конструкція ПЕП.

Розглянуто циліндричний перетворювач силової конструкції (рис. 5.6), який складається з: 1 - активний елемент; 2 – полімерна герметизація; 3 – металева герметизація; 4 - дві кришки.

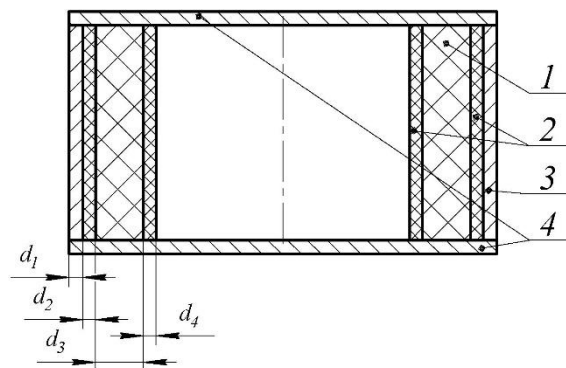


Рис. 5.6. Фізична модель циліндричного ПЕП силової конструкції

На відміну від компенсованих конструкцій, теплове поле цього приладу не є симетричним відносно середнього радіуса перетворювача. Крім того, оскільки зовнішня частина циліндра контактує з рідиною, а внутрішня - з газом, умови відведення тепла від зовнішньої та внутрішньої поверхонь різні.

Пропонується розрахункова модель (рис. 5.7) для знаходження теплового поля такого перетворювача у вигляді системи з чотирьох нескінченних по висоті шарів, різної товщини $d_1..d_4$, кожен з яких характеризується своїми фізичними параметрами (коефіцієнти теплопровідності $\lambda_{T1}.. \lambda_{T4}$). Шари 1, 2 – герметизуючі шари розміщені ззовні; 3 – п'єзокерамічний активний елемент; 4 – герметизуючий шар з середини. Коефіцієнти віддачі тепла зовнішньої поверхні перетворювача у рідину – α_{T1} , внутрішньої у газове середовище – α_{T4} . Джерелом виділення тепла є п'єзокерамічний активний елемент. Тепловиділення характеризується величиною q_{V3} (об'ємна потужність джерел).

Слід зазначити, що ця модель не враховує тепловіддачу від торцевих поверхонь перетворювача. Однак, оскільки площа торцевої поверхні п'єзоелемента значно менша за площу бічної поверхні, і ця поверхня відокремлена від середовища ізоляційним матеріалом з досить низьким коефіцієнтом теплопровідності, цей факт в кінцевому підсумку не має суттєвого впливу на остаточні результати розрахунків.

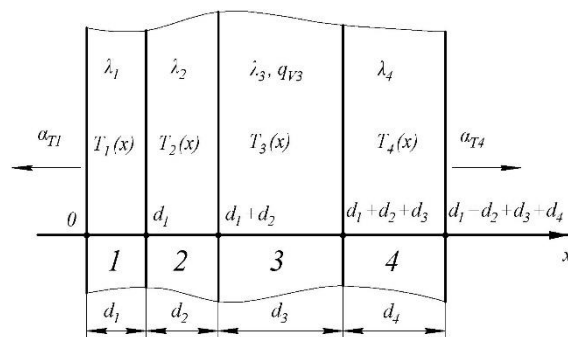


Рис. 5.7. Розрахункова модель циліндричного перетворювача силового типу

Теплове поле для стаціонарного режиму та багат шарової конструкції знайдемо як розв'язок рівняння теплопровідності для кожного з i шарів:

$$\lambda_{T,i} \frac{d^2 T_i(x)}{dx^2} + q_{V,i} = 0,$$

де $T_i(x)$ – розподіл температури в i -му шарі конструкції

Температуру на зовнішній поверхні перетворювача позначимо T_{S1} (границя з рідиною), температуру на внутрішній поверхні перетворювача – T_{S4} (границя з газом), температура середовища – T_c .

Граничні умови:

1) рівність теплових потоків на границях шарів:

$$\text{а) } \lambda_{T1} \frac{dT_1(x)}{dx} \Big|_{x=d_1} = \lambda_{T2} \frac{dT_2(x)}{dx} \Big|_{x=d_1};$$

$$\text{б) } \lambda_{T2} \frac{dT_2(x)}{dx} \Big|_{x=d_1+d_2} = \lambda_{T3} \frac{dT_3(x)}{dx} \Big|_{x=d_1+d_2};$$

$$\text{в) } \lambda_{T3} \frac{dT_3(x)}{dx} \Big|_{x=d_1+d_2+d_3} = \lambda_{T4} \frac{dT_4(x)}{dx} \Big|_{x=d_1+d_2+d_3};$$

2) рівність теплових потоків на границі тіла з середовищем:

$$\text{а) } \lambda_{T1} \frac{dT_1(x)}{dx} \Big|_{x=0} = \alpha_{T1} (T_{S1} - T_c);$$

$$\text{б) } -\lambda_{T4} \frac{dT_4(x)}{dx} \Big|_{x=d_1+d_2+d_3+d_4} = \alpha_{T4} (T_{S4} - T_c);$$

3) рівність температур на границях шарів:

$$\text{а) } T_1(x) \Big|_{x=d_1} = T_2(x) \Big|_{x=d_1}; \quad \text{б) } T_2(x) \Big|_{x=d_1+d_2} = T_3(x) \Big|_{x=d_1+d_2};$$

$$\text{в) } T_3(x) \Big|_{x=d_1+d_2+d_3} = T_4(x) \Big|_{x=d_1+d_2+d_3};$$

4) температури на поверхні перетворювача позначимо як:

$$\text{а) } T_1(x) \Big|_{x=0} = T_{S1}; \quad \text{б) } T_4(x) \Big|_{x=d_1+d_2+d_3+d_4} = T_{S4}.$$

Розв'язок рівняння теплопровідності для наступних ділянок на вісі x , які відповідають кожному з шарів буде мати вигляд:

$$0 < x < d_1; \quad T_1(x) = C_1 x + C_2;$$

$$d_1 < x < d_1 + d_2; \quad T_2(x) = C_3 (x - d_1) + C_4;$$

$$d_1 + d_2 < x < d_1 + d_2 + d_3;$$

$$T_3(x) = -\frac{q_{V3}}{2\lambda_{T3}}(x - (d_1 + d_2))^2 + C_5(x - (d_1 + d_2)) + C_6;$$

$$d_1 + d_2 + d_3 < x < d_1 + d_2 + d_3 + d_4; T_4(x) = C_7(x - (d_1 + d_2 + d_3)) + C_8,$$

де $C_1 \dots C_8$ – невідомі постійні, які разом із температурами поверхонь T_{S1} та T_{S4} можливо знайти з граничних умов.

Підстановкою розв’язків рівнянь теплопровідності у граничні умови знаходимо невідомі величини:

$$T_{S1} = \frac{q_{V3} \left(\frac{d_3^2}{2\lambda_{T3}} + \frac{d_3 d_4}{\lambda_{T4}} + \frac{d_3}{\alpha_{T4}} \right)}{\alpha_{T1} \left(\frac{d_1}{\lambda_{T1}} + \frac{d_2}{\lambda_{T2}} + \frac{d_3}{\lambda_{T3}} + \frac{d_4}{\lambda_{T4}} + \frac{1}{\alpha_{T4}} \right) + 1} + T_c; \quad C_1 = \frac{\alpha_{T1}}{\lambda_{T1}}(T_{S1} - T_c); \quad C_2 = T_{S1};$$

$$C_3 = C_1 \frac{\lambda_{T1}}{\lambda_{T2}}; \quad C_4 = C_1 d_1 + C_2; \quad C_5 = C_1 \frac{\lambda_{T1}}{\lambda_{T3}}; \quad C_6 = C_3 d_2 + C_4; \quad C_7 = -\frac{d_3 q_{V3}}{\lambda_{T4}} + C_5 \frac{\lambda_{T3}}{\lambda_{T4}};$$

$$C_8 = -\frac{d_3^2 q_{V3}}{2\lambda_{T3}} + C_5 d_3 + C_6; \quad T_{S4} = -\frac{\lambda_{T4}}{\alpha_{T4}} C_7 + T_c.$$

Для того, щоб кількісно порівняти розраховане теплове поле перетворювача силової конструкції з тепловим полем перетворювача компенсованого типу (наприклад, перетворювача, герметизованого шарами металу та полімеру, рис. 5.8, а), розраховано теплові поля для наступних значень параметрів (рис. 5.8, б) [138, 139]:

– шар 1 – титановий сплав ВТ1-0, $d_1 = 1,5$ мм, $\lambda_{T1} = 16$ Вт/(м·К);

– шар 2 – ізоляційний матеріал АГ-4С, $d_2 = 1$ мм, $\lambda_{T2} = 0,315$ Вт/(м·К);

– шар 3 – п'єзокераміка ЦТБС-3, $d_3 = 8$ мм, $\lambda_{T3} = 1,9$ Вт/(м·К), $q_{V3} = 330 \cdot 10^3$ Вт/м³;

- шар 4 – ізоляційний матеріал АГ-4С, $d_4 = 1\text{ мм}$, $\lambda_{T4} = 0,315\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;
- температура середовища $T_c = 20^\circ\text{C}$;
- тепловіддача зовнішньої поверхні здійснюється у воду $\alpha_{T1} = 350\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ (середнє значення коефіцієнту для тепловіддачі «метал – спокійна вода» [15]);
- тепловіддача внутрішньої поверхні здійснюється в газ $\alpha_{T4} = 7\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ (середнє значення коефіцієнту для тепловіддачі «метал – повітря»)

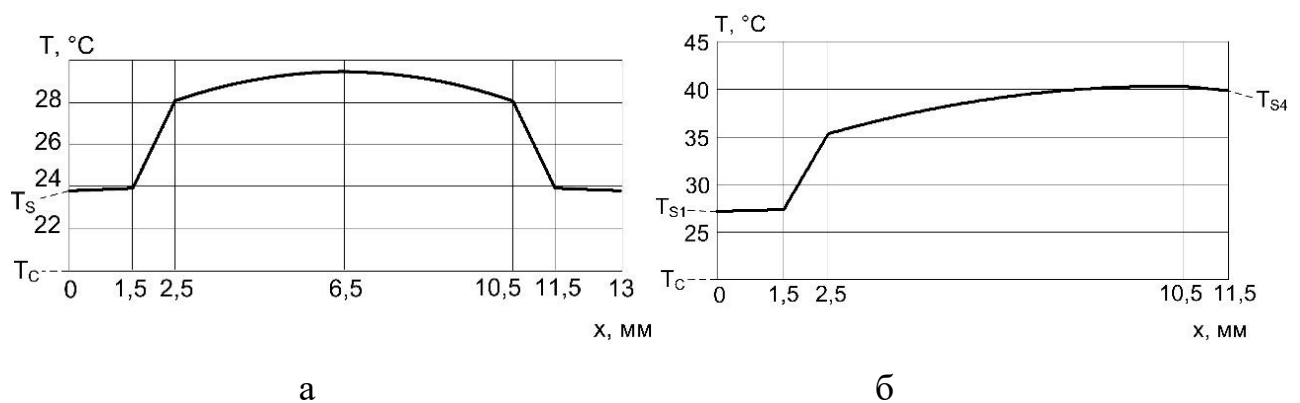


Рис. 5.8. Теплові поля циліндричного перетворювача компенсованої (а) та силової (б) конструкцій

Порівняння теплових полів циліндричних п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів компенсованої та силової конструкцій показує наступні відмінності:

- температура нагрівання циліндричного перетворювача силової конструкції значно вища;
- теплове поле перетворювача в силівій конструкції є несиметричним відносно середнього радіуса п'єзoeлементa; максимальне значення температури буде зміщене в бік поверхні з меншою тепловіддачею, тобто всередину;

- подібний розподіл теплового поля силового типу перетворювача спостерігається також і у вакуумованих конструкціях перетворювачів, де відсутній тепловідвід через внутрішню циліндричну поверхню.

Крім того, механічна цілісність перетворювача може бути порушена через великі перепади температур всередині перетворювача, де залишаються ділянки з можливими значними температурними напруженнями.

5.3.2. Постановка задачі для стержневого перетворювача, умови однозначності, результати знаходження теплового поля

Типова конструкція стержневого п'єзокерамічного перетворювача, (рис. 5.9), що працює на випромінювання звуку (його ще називають перетворювачем типу Ланжевєн [147-151]), складається з трикомпонентної коливальної системи і також може містити корпус. Механічна коливальна система утворюється з випромінюючої накладки, п'єзокерамічного активного елементу і задньої накладки. Механічний резонанс коливальної системи визначається матеріалами накладок та їх геометричними розмірами і є робочою частотою випромінювання перетворювача. З'єднання елементів механічної коливальної системи здійснюється за допомогою болта або шпильки, і тим самим створюються попередні статичні напруження в коливальній системі, що підвищує її механічну міцність. Електричне з'єднання п'єзоелементів проводиться проводами, підпаяними до мідних контактних пластин, а зовнішнє підключення перетворювача здійснюється електричним кабелем.



Рис.5.9. П'єзокерамічний електроакустичний перетворювач стержневого типу

Для електроакустичних приладів такої конструкції був розроблений наступний метод кількісної оцінки створюваних ними теплових полів [140]. На прикладі конструкції конкретного перетворювача розглянемо використання запропонованого методу. Наступні параметри є найбільш характерними для такого типу конструкцій перетворювачів.

Умови однозначності для стержневого перетворювача:

1) геометричні умови:

- конструкція складається з двох накладок: тильної та випромінюючої та активного елементу.
- задня накладка має форму циліндра з отвором для армуючого болта зовнішнім діаметром 50 мм і внутрішнім 17 мм.
- активний елемент це 4 кільця п'єзокераміки товщиною 10 мм, зовнішнім діаметром 38 мм, внутрішнім діаметром 17 мм.
- випромінююча накладка виконана у формі зрізаного конуса з різьбою для болта М12, діаметр основи конуса - 60 мм, діаметр верхньої частини конуса - 38 мм, висота - 30 мм.

2) фізичні умови:

- навколишнє середовище – повітря, температура 25°C .
- задня накладка – сталь AISI 1020, густина 7900 кг/м^3 , коефіцієнт теплопровідності $47 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, модуль пружності $20 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$.
- п'єзокерамічний активний елемент – п'єзокераміка APC 840, густина 7600 кг/м^3 , коефіцієнт теплопровідності $1.9 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, модуль пружності на розтягування та стиснення по товщині $6.8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$.
- випромінююча накладка – алюміній Alloy 1060, густина 2700 кг/м^3 , коефіцієнт теплопровідності $200 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, модуль пружності $6.9 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$.

3) часові умови:

- аналізується стаціонарний тепловий режим.

4) граничні умови:

- коефіцієнт тепловіддачі металевої поверхні в газ $\alpha_1 = \alpha_3 = 5.6 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Можна визначити три типи граничних умов: рівність температур у точках контакту шарів (температура на границі контакту компонентів перетворювача і на поверхні накладки, що контактує із зовнішнім середовищем), рівність теплового потоку на границі накладка – середовище і рівність теплового потоку на границях шарів. Тепловий потік випромінюється від активного елемента, тобто умовно від центру перетворювача, в напрямку обох накладок. Тепловий потік є векторною величиною і спрямований у бік зменшення температури.

Ідея знаходження теплового поля конструкції полягає в тому, щоб спочатку спростити перетворювач до найважливіших його компонентів, а потім застосувати ці спрощення до нескінченно високих шарів. Рівняння теплопередачі розв'язуються для кожного шару. Потім необхідно використати граничні умови для знаходження невідомих констант, що залишилися після інтегрування. Сама методика розв'язання задачі знаходження теплового поля стрижневого перетворювача висвітлена в [140, 144].

Конструкцію стержневого перетворювача замінено його стратифікованою моделлю, яка складається з трьох шарів (рис. 5.10)

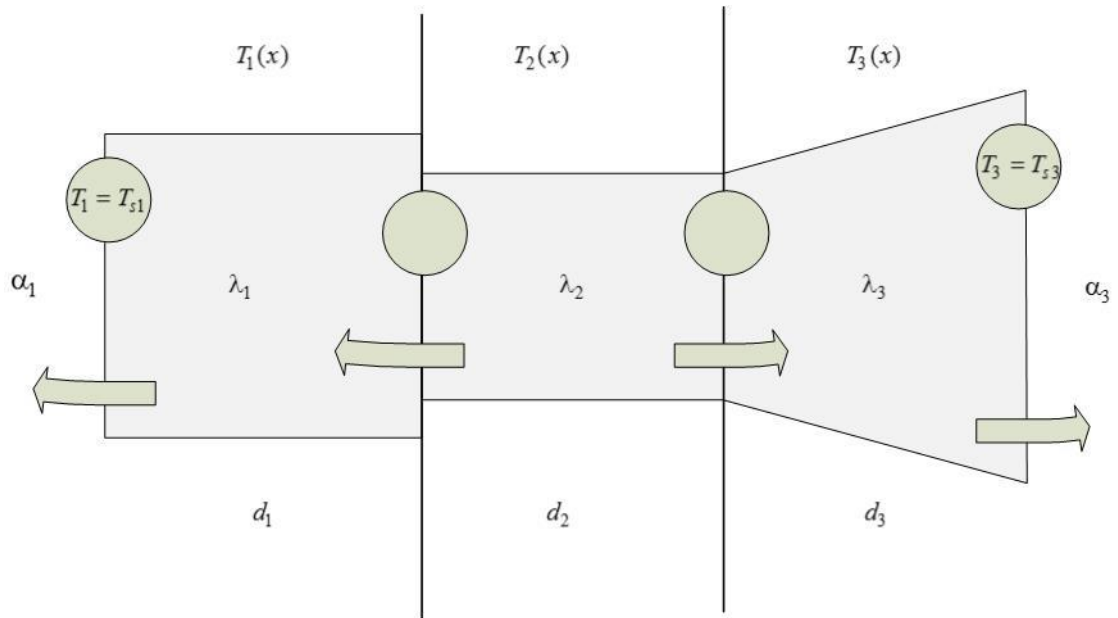


Рис. 5.10. Стратифікована модель конструкції стержневого перетворювача.

На рисунку колами умовно позначено граничні умови рівності температур, а стрілками – граничні умови щодо рівності теплових потоків на межі конструкційних елементів та середовищ. $T_i(x)$ – рівняння для визначення температури в i -ому шарі. λ_i, α_i, d_i – відповідно коефіцієнти теплопровідності, тепловіддачі, та товщина i -го шару.

Рівняння теплопровідності (5.5) для кожного шару та його розв'язок у загальному вигляді полягають у наступному:

- пасивний шар 1 – тильна накладка:

$$0 < x \leq d_1$$

$$\frac{d^2 T_1(x)}{dx^2} = 0,$$

$$T_1(x) = xC_1 + C_2;$$

- тепловиділяючий шар 2 – активний п'єзокерамічний елемент:

$$d_1 < x \leq d_1 + d_2$$

$$\frac{d^2 T_2(x)}{dx^2} + \frac{q_v}{\lambda_2} = 0,$$

$$\frac{d^2 T_2(x)}{dx^2} = -\frac{q_v}{\lambda_2}$$

$$\int_{d_1}^x \frac{d^2 T_2(x)}{dx^2} dx = -\frac{q_v}{\lambda_2} \int_{d_1}^x dx,$$

$$\frac{dT_2(x)}{dx} = -\frac{q_v}{\lambda_2} \cdot (x - d_1) + C_3,$$

$$\int_{d_1}^x \frac{dT_2(x)}{dx} dx = \int_{d_1}^x \left(-\frac{q_v}{\lambda_2} \cdot (x - d_1) + C_3 \right) dx,$$

$$T_2(x) = -\frac{q_v}{2\lambda_2} (x - d_1)^2 + C_3(x - d_1) + C_4;$$

- пасивний шар 3 – випромінююча накладка:

$$d_1 + d_2 < x \leq d_1 + d_2 + d_3$$

$$\frac{d^2 T_3(x)}{dx^2} = 0,$$

$$T_3(x) = C_5(x - (d_1 + d_2)) + C_6$$

Для знаходження невідомих констант $C_1..C_6$ використаємо такі граничні умови:

- температури в точках контакту шарів рівні:

$$T_{1|x=0} = T_{s1},$$

$$T_{1|x=d_1} = T_{2|x=d_1},$$

$$T_{2|x=d_1+d_2} = T_{3|x=d_1+d_2},$$

$$T_{3|x=d_1+d_2+d_3} = T_{s3},$$

де T_{s1} – температура поверхні випромінюючої накладки, T_{s3} – температура поверхні тильної накладки.

- теплові потоки на границях тіла з оточуючим середовищем рівні:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x)}{\partial x} = \alpha_1 (T_{s1} - T_c)_{|x=0},$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3(x)}{\partial x} = \alpha_3 (T_{s3} - T_c)_{|x=d_1+d_2+d_3}.$$

- теплові потоки на границях шарів рівні:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_{|x=d_1}} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(x)}{\partial x_{|x=d_1}},$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(x)}{\partial x_{|x=d_1+d_2}} = \lambda_3 \frac{\partial T_3(x)}{\partial x_{|x=d_1+d_2}}.$$

Дані граничні умови використовуються для заміни конструкції перетворювача трьома шарами. Ці шари замінюють найважливіші структурні елементи приладу, при цьому такі конструкційні елементи як армування та корпус не враховуються. Припускається, що датчик є новим і контакт між шарами є надійним.

Зв'язок між невідомими константами та температурою поверхні накладок отримано шляхом підстановки загального розв'язку рівняння теплопередачі в граничні умови наступним чином.

Для першої групи граничних умов:

$$T_1(x=0) = T_{s1},$$

$$C_2 = T_{s1},$$

$$T_3(x = d_1 + d_2 + d_3) = T_{s3},$$

$$d_3 \cdot C_5 + C_6 = T_{s3},$$

$$T_1(x = d_1) = T_2(x = d_1),$$

$$d_1 \cdot C_1 + C_2 = C_4,$$

$$T_2(x = d_1 + d_2) = T_3(x = d_1 + d_2),$$

$$-\frac{q_v}{2\lambda_2} d_2^2 + C_3 \cdot d_2 + C_4 = C_6.$$

Для другої групи граничних умов:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x=0)}{\partial x} = \alpha_1(T_{s1} - T_c),$$

$$\lambda_1 \cdot C_1 = \alpha_1(T_{s1} - T_c),$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3(x=d_1+d_2+d_3)}{\partial x} = \alpha_3(T_{s3} - T_c),$$

$$-\lambda_3 \cdot C_5 = \alpha_3(T_{s3} - T_c).$$

Для третьої групи граничних умов:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x=d_1)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(x=d_{12})}{\partial x},$$

$$\lambda_1 C_1 = \lambda_2 C_3,$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(x=d_1+d_2)}{\partial x} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3(x=d_1+d_2)}{\partial x},$$

$$\lambda_2 \left(\frac{-q_v}{\lambda_2} d_2 + C_3 \right) = \lambda_3 C_5.$$

Після ряду перетворень, знайдемо значення невідомих констант та температури:

$$T_{s1} = T_c + q_v \cdot d_2 \cdot \frac{B}{A}, \text{ де}$$

$$A = \left[1 + \alpha_1 \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_3} \right) \right],$$

$$B = \left[\frac{1}{\alpha_3} + \frac{d_2}{2\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} \right],$$

$$T_{s3} = -\frac{\alpha_1}{\alpha_3} T_{s1} + T_c \left[\frac{\alpha_1}{\alpha_3} + 1 \right] + \frac{d_2}{\alpha_3} q_v,$$

$$C_1 = \frac{\alpha_1}{\lambda_1} (T_{s1} - T_c),$$

$$C_2 = T_{s1},$$

$$C_3 = \frac{\alpha_1}{\lambda_2} (T_{s1} - T_c),$$

$$C_4 = d_1 \cdot C_1 + C_2,$$

$$C_5 = \frac{\alpha_3 (-T_{s3} + T_c)}{\lambda_3},$$

$$C_6 = -\frac{q_v}{2\lambda_2} (d_2)^2 + C_3 \cdot d_2 + C_4.$$

Для тришарової моделі, яка імітує стержневий електроакустичний перетворювач, було розраховане температурне поле на основі розв'язку диференціального рівняння теплопровідності для кожного з шарів.

Отримані результати температурного поля для потужності втрат, що дорівнює 15 Вт. Розрізняють об'ємну та поверхневу густину теплового потоку. В джерелах використовують об'ємну густину теплового потоку (іноді об'ємну густину теплового потоку з коефіцієнтом 0,24, походження якого не пояснюють), в цьому випадку $q = 43 \cdot 10^3 \text{ Вт} / \text{м}^3$ і максимальна температура в п'єзокерамічному активному елементі становить 120°C . При об'ємній густині теплового потоку $q = 108 \cdot 10^3 \text{ Вт} / \text{м}^3$ максимальна температура активного елементу становить більше 400°C . Але ці результати мають місце в конструкціях циліндричного перетворювача. У випадку стержньового перетворювача відношення бічної площі поверхні, що контактує з наступним шаром, до товщини шару не буде таким великим. Для того щоб використовувати тришарову модель для стержневого перетворювача, слід використовувати поверхневу густину теплового потоку $q = 43 \cdot 10^3 \text{ Вт} / \text{м}^2$, беручи до розрахунку площу поперечного перерізу елементу, що випромінює тепло, $S_{\text{non.перерізу}} = 0.34 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. В такому випадку $T_{s1} = 179,6^\circ\text{C}$, $T_{s2} = 180^\circ\text{C}$.

Розподіл температур вздовж осі стержневого перетворювача, що працює в повітрі показано на рисунку 5.11, де по осі абсцис відкладена довжина перетворювача, по осі ординат його температура.

Виходячи з графіка на рисунку 5.11 та рівнянь, бачимо нелінійну залежність температури на ділянці, що відповідає п'єзокераміці, де відбувається виділення тепла та нагрівання. На відрізьку металевих накладок залежність температури від координат – лінійна. Зазначимо, що коефіцієнт теплопровідності алюмінію майже в 4 рази більший за теплопровідність сталі, а температура накладок відрізняється на 0.4°C .

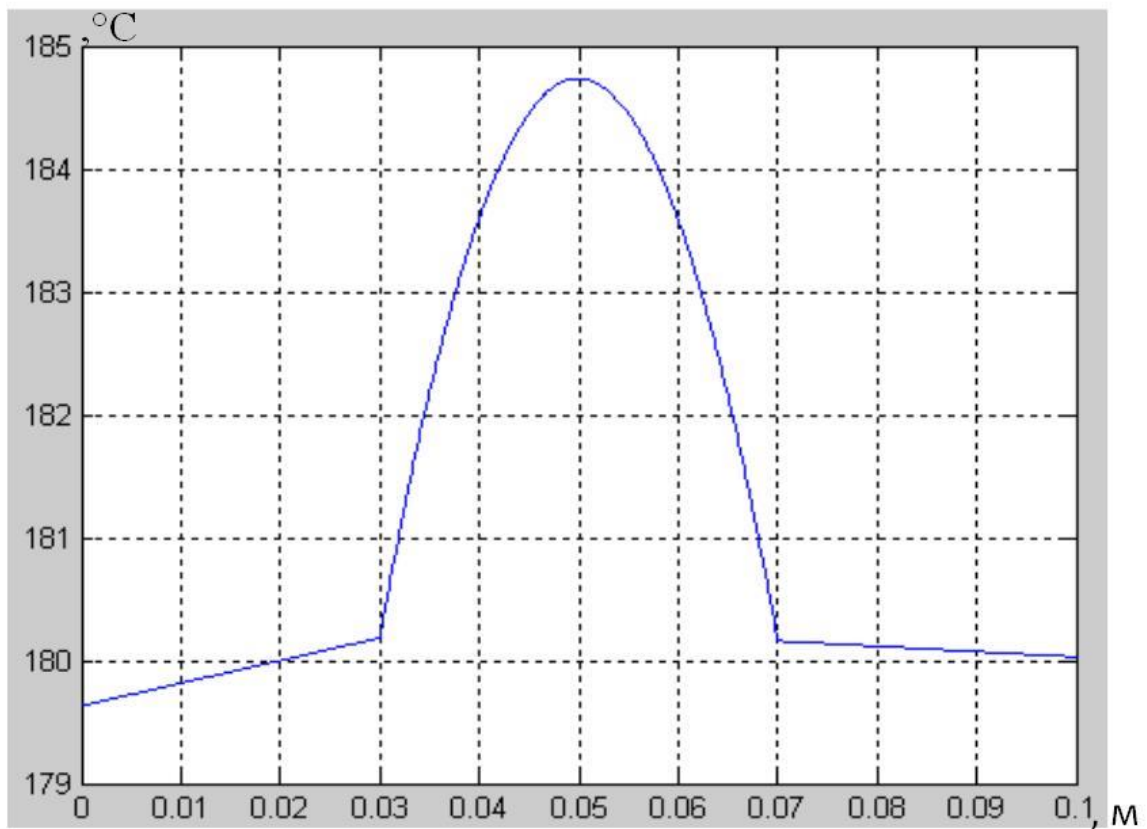


Рис. 5.11. Теплове поле стержневого перетворювача, що розглядається

Стержневі перетворювачі такої конструкції досить часто використовують для випромінювання акустичної енергії в рідину. Змінюючи коефіцієнт тепловіддачі металевої накладки на $\alpha_2 = 350 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, (це середнє значення, характерне для тепловіддачі металевої поверхні в спокійну рідину), були отримані значення температур $T_{s1} = 45^\circ\text{C}$, $T_{s2} = 30^\circ\text{C}$ при максимальній температурі в активному елементі 46°C .

5.4. Моделювання та експериментальні дослідження теплових полів конструкцій ПЕП

5.4.1. Вибір програми для моделювання

Існує величезна кількість програм для створення тривимірних моделей. Є також програми, розроблені спеціально для розрахунку виробів з п'єзокераміки (PiezoCAD). Однак вони не підходять для моделювання теплових полів. Для виконання завдання моделювання теплового поля електроакустичного перетворювача необхідно призначити матеріал, визначити його властивості, визначити початкові умови, визначити температури, призначити різні методи теплопередачі та проаналізувати тепловіддачу. Розглянуто кілька програмних продуктів, які мають можливість реалізовувати аналіз конструкцій електроакустичних перетворювачів в тепловій області.

ANSYS може виконувати як стаціонарні, так і перехідні теплові розрахунки. Він може розраховувати лінійні та нелінійні властивості матеріалів, теплопровідність, конвекцію та випромінювання всередині та між елементами і поверхнями. Отримані результати розрахунку теплового поля можуть бути передані для інших аналізів. COMSOL також може використовувати додаткові модулі для моделювання фізичних систем і специфічних явищ і процесів. Модуль Теплопередача можна використовувати для дослідження впливу нагрівання або

охолодження на різні пристрої, компоненти або процеси. Інструменти, доступні в цьому модулі, дозволяють вивчати механізми теплопередачі, такі як теплопровідність, конвекція і випромінювання, а також інші фізичні явища, такі як механіка, гідродинаміка, електромагнетизм і хімічні реакції. Модуль використовується для вирішення інших завдань, де виділення, поглинання або передача тепла чи іншої енергії є важливим процесом. Програмне забезпечення SolidWorks надає можливість створювати 2D і 3D моделі та відносно легко передавати дані в інші додатки. Воно має можливість створювати 2D і 3D моделі та відносно легко передавати дані в інші програми. Додатковий модуль Simulation дозволяє проводити теплове моделювання, визначення частот механічних резонансних коливань системи, параметричну оптимізацію, випробування на падіння та інші лінійні і нелінійні аналізи, а також зручний і різноманітний висновок (таблиці, графіки і багато форматів файлів, які можна експортувати в текстовий редактор). У [157] показано схожість між структурним і тепловим аналізом. Для моделювання рідин існує додатковий модуль Flow Simulation, який дозволяє аналізувати потів рідини.

Програма SolidWorks [157-159] ідеально підходить для розв'язання задач аналізу теплового поля перетворювачів, відповідає вищезазначеним вимогам і має довідник (Instructions and Tips Helper) з вичерпною інформацією. Система використовує алгоритми скінченних елементів для аналізу.

5.4.2. Програмне середовище SolidWorks для моделювання теплових полів

За методом скінченних елементів 3D-модель розділяється на ряд невеликих частин, що складаються з простих форм, які називаються елементами. Спільні точки елементів називають вузлами. В програмному середовищі SolidWorks початкова модель перетворюється в мережу з'єднаних між собою дискретних

елементів. Розмір та якість сітки визначає точність подальших розрахунків, тому процес розбиття моделі на елементи є дуже важливим. Сітка може бути застосована до всієї моделі, і нею можна керувати автоматично або вибірково (в комбінації), зменшуючи розмір елементів в найбільш критичних або складних частинах. Для 3D-моделей сітка створюється з тривимірних тетраедричних суцільних елементів. Після створення сітки до її вузлів застосовуються параметри конкретного аналізу, і ці значення інтерполюються вздовж елемента [157].

Для аналізу теплового поля твердого тіла використано додаток Simulation програми SolidWorks. Розраховано розподіл температури в перехідних та усталених режимах, розраховано термічний опір в зоні контакту деталей та проаналізовано механічні напруження внаслідок теплового розширення. Механізми теплопередачі, що використані в аналізі – теплопровідність, конвекція та теплове випромінювання. Програмне середовище SolidWorks Simulation реалізує метод скінченних елементів, де безпосередньо моделюється теплопровідність, а конвективна теплопередача є граничною умовою. Конвекція задається параметром конвекції Convection ($\text{Вт/ м}^2 \cdot \text{К}$), а густина теплового потоку – параметром теплової потужності Heat Power (Вт). Різниця між тепловою потужністю і тепловим потоком полягає в тому, що теплова потужність – це фізична величина, яка характеризує швидкість передачі і перетворення енергії, в той час як тепловий потік – це вектор, що визначає кількість тепла, яке проходить через ізотермічну поверхню за одиницю часу. Тепловий аналіз програми базується на законі Фур'є для теплових потоків.

5.4.3. Теплове поле циліндричного перетворювача, отримане шляхом моделювання

Для моделювання теплового поля циліндричного перетворювача були використані 5 циліндричних шарів і прийняті характеристики матеріалів, ідентичні до матеріалів з підрозділу 5.3.

Модель циліндричного перетворювача компенсованої рідиннозаповненої конструкції та його теплове поле показано на рисунку 5.12:

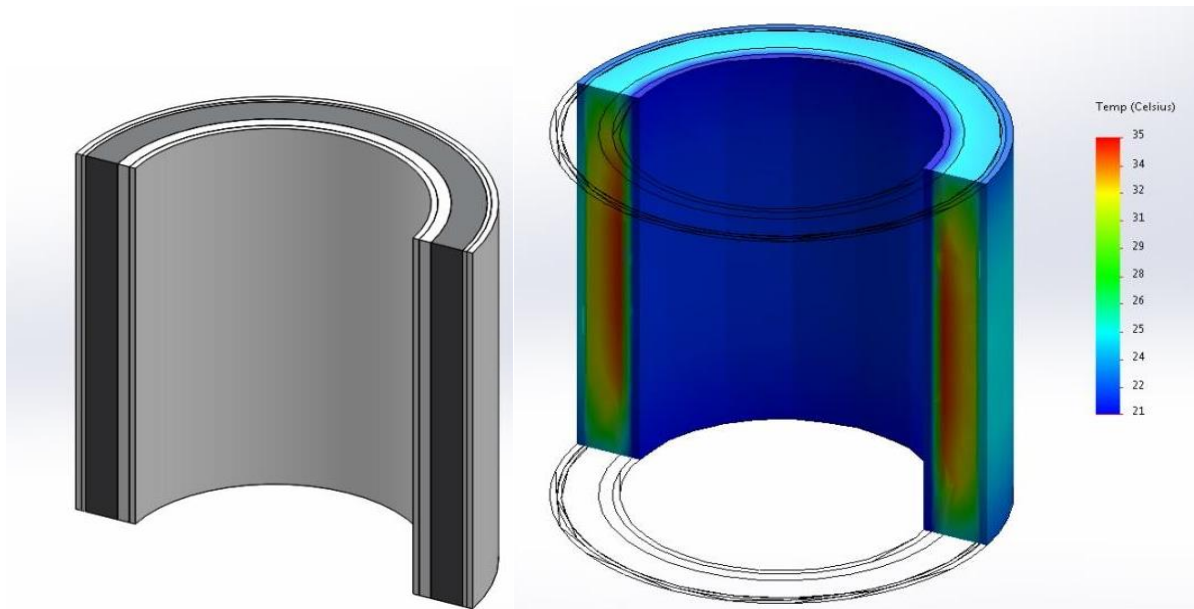


Рис. 5.12. Циліндричний перетворювача компенсованої рідиннозаповненої конструкції: *а* – модель, *б* - теплове поле

Слід зазначити, що змодельоване теплове поле циліндричного перетворювача (рис. 5.12 б) отримане при умові, що тепловіддача застосовувалась до всіх поверхонь, а не тільки до внутрішньої та зовнішньої поверхонь, як в реальних умовах. В іншому випадку поле рівномірне по товщині. Потужність втрат застосовано до активного елементу з п'єзокераміки (66 Вт). Температура оточуючого середовища 20⁰С (вода).

Графік розподілу теплового поля при моделюванні всередині перетворювача наведено на рис.5.13. Співставлення графіків рис. 5.5 та 5.12 свідчить про їх подібність.

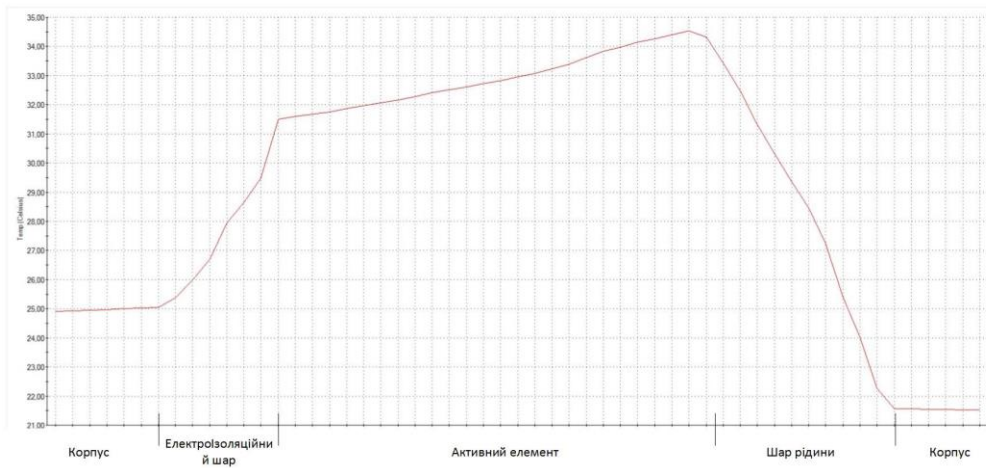


Рис. 5.13. Графік теплового поля циліндричного перетворювача компенсованої рідиннозаповненої конструкції

Результати моделювання конструкції циліндричного перетворювача з урахуванням наявності торцевої герметизації наведено на (рис.5.14).

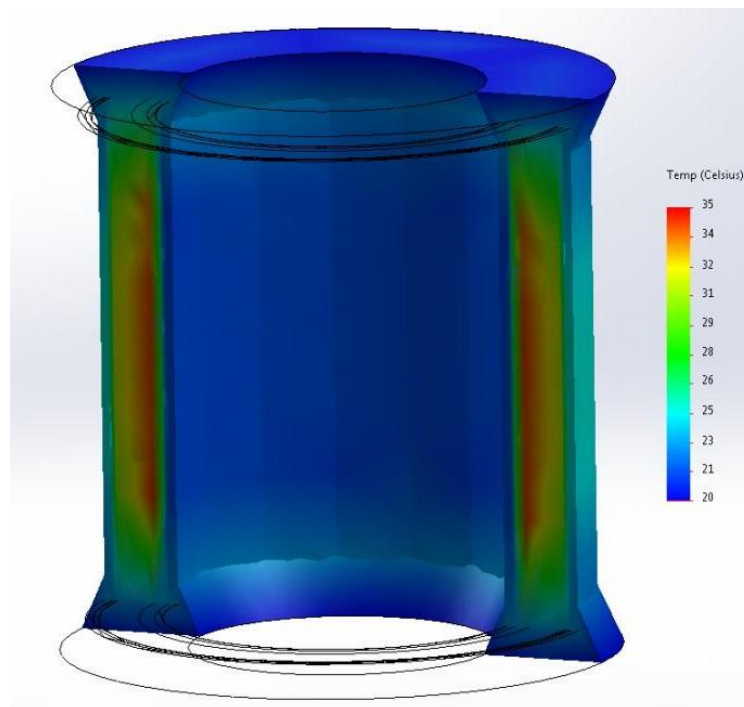


Рис. 5.14. Теплове поле конструкції рідиннозаповненого перетворювача з герметизацією торців

Як бачимо, розподіл температур в горизонтальній площині схожий з розподілом температур, наведеним на рис. 5.12. Є відмінність температурного розподілу на ділянках, які знаходяться ближче до торців перетворювача. Слід зазначити, що даний випадок є максимально наближеним до реальної конструкції циліндричного перетворювача.

5.4.4. Теплове поле стержневого перетворювача, отримане шляхом моделювання

Теплове поле спрощеного стержневого перетворювача, отримане шляхом моделювання показано на рис. 5.15. Коефіцієнт тепловіддачі прийнятий $5,6 \text{ Вт/м}^2$. Тепловіддача відбувається через конвекцію на тильній та випромінюючій накладках, ігноруючи тепловіддачу активного елементу. Потужність тепловиділення активного елементу становить 15 Вт.

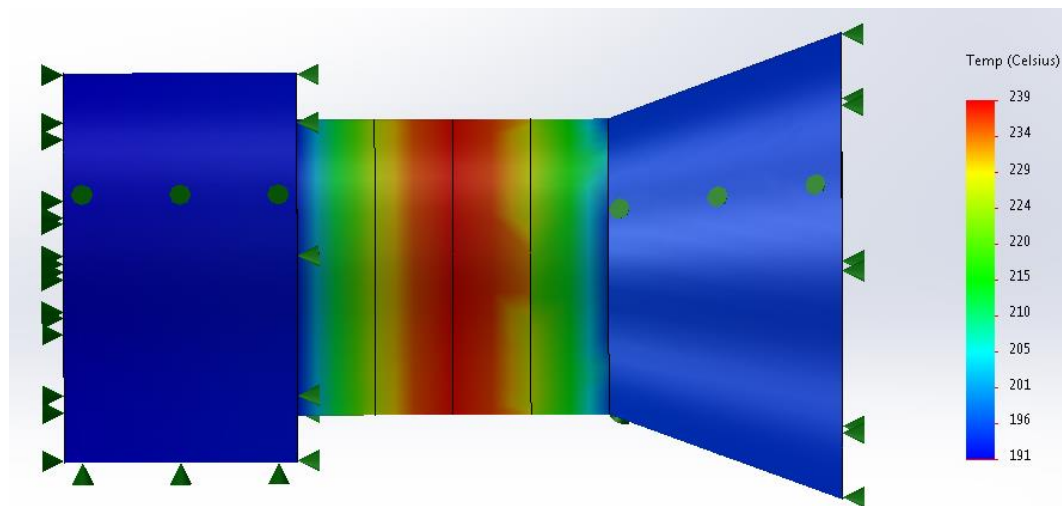


Рис. 5.15. Теплове поле стержневого перетворювача, отримане шляхом моделювання

Зниження температури випромінюючої накладки пояснюється тим, що вона має більшу площу тепловідведення, порівняно з тильною накладкою.

Коли конвекція була застосована до всіх зовнішніх поверхонь (включаючи активні п'єзокерамічні елементи), максимальна і мінімальна температури знизилися відповідно на 55 °C і 43 °C.

Для зручності порівняння даних результатів з тепловим полем, отриманим за аналітичними розрахунками (рис. 5.11), побудований графік температури точок поверхні перетворювача (рис.5.16), отриманий шляхом моделювання.

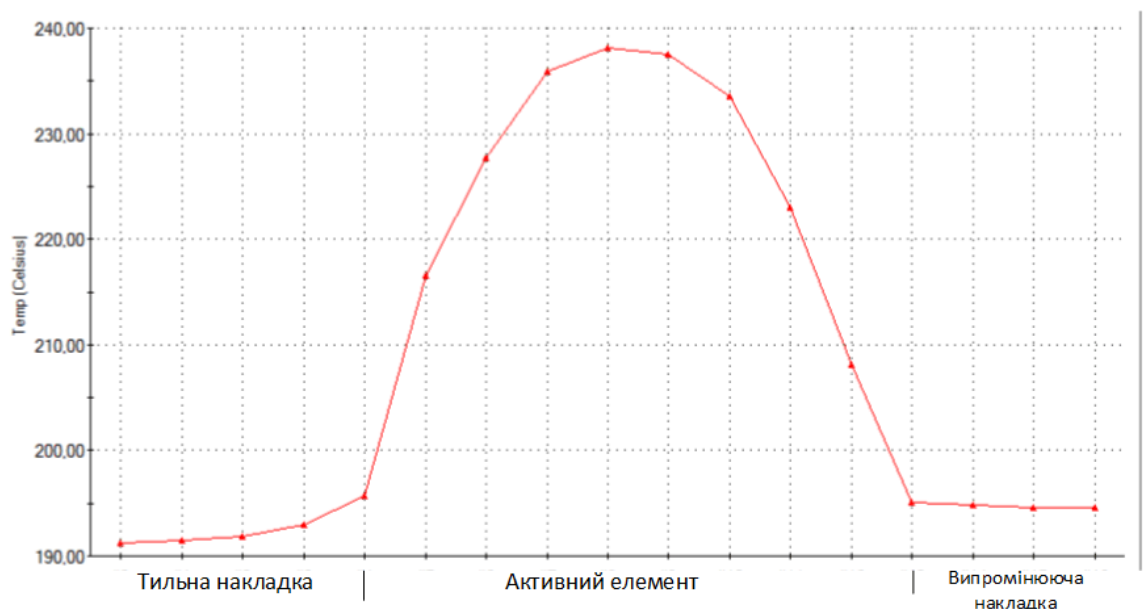


Рис. 5.16. Розподіл температури в стержневому перетворювачі (моделювання)

Співставлення графіків рис. 5.11 і 5.16 свідчать про їх подібність.

Розглянемо моделювання теплового поля стержневого перетворювача більш реальної конструкції з урахуванням наскрізних отворів в п'єзокерамічних елементах і тильній накладці, а також додаткових елементів конструкції – армуючого болта та металевої шайби. Вони здійснюють значний вплив на теплове поле перетворювача, через зв'язок болта з випромінюючою накладкою,

та той факт, що він заповнює порожнину у п'єзокераміці і бере на себе частину тепла.

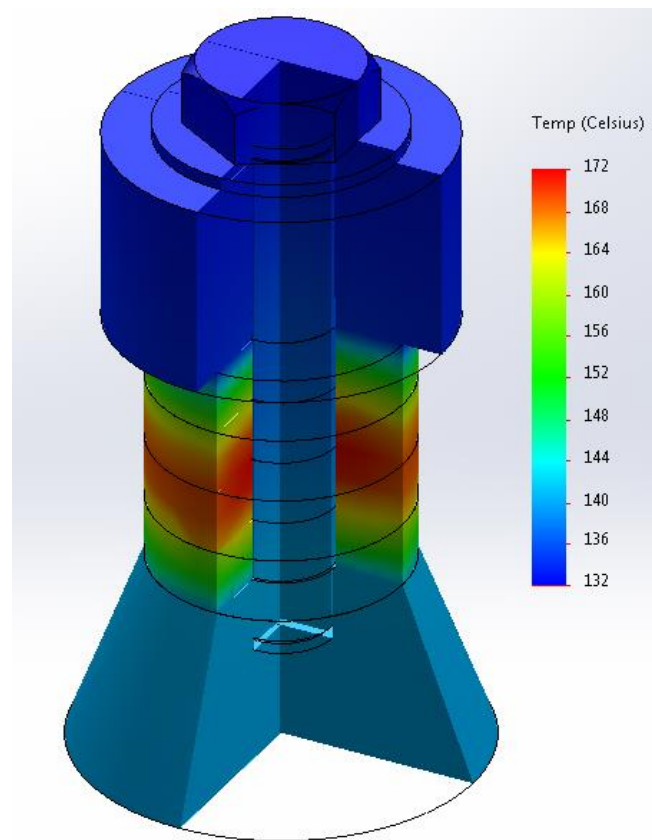


Рис. 5.17. Теплове поле стержневого перетворювача з урахуванням армуючого елемента

Розподіл температури на поверхні перетворювача з урахуванням армуючого болта показано на рис. 5.18.

І в цьому випадку підтверджується тотожність результатів, отриманих аналітичним методом та шляхом моделювання. Однак, як і у випадку з циліндричним перетворювачем з герметизацією торців, даний випадок є максимально наближеним до реальної конструкції стержневого перетворювача. Попередні результати були отримані в сталому режимі.

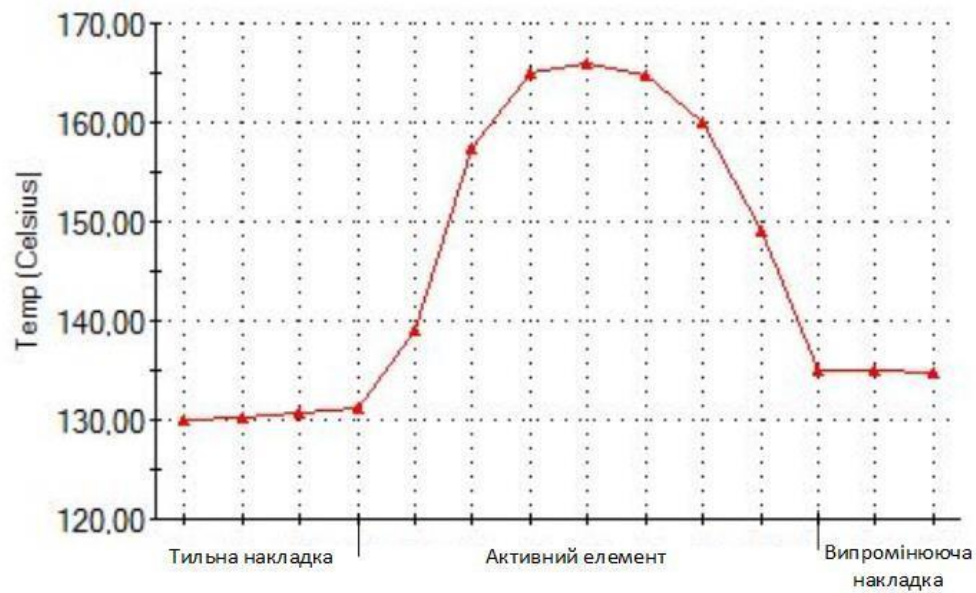


Рис. 5.18. Розподіл температури на поверхні перетворювача з урахуванням елемента армування

На рис. 5.19 наведено частину перехідного теплового процесу. Для цього, взято три точки: на передній і тильній накладках та посередині активного елемента з п'єзокераміки.

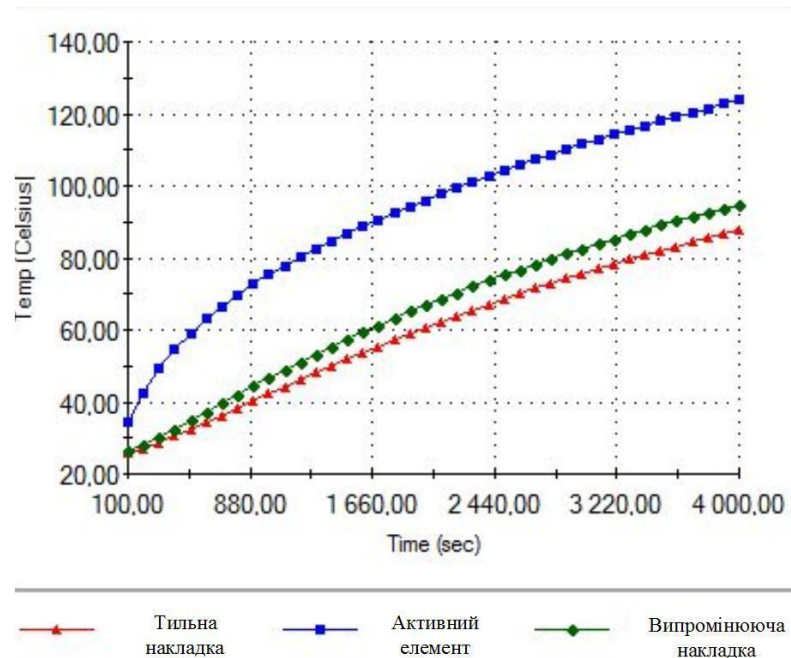


Рис. 5.19. Графік частини перехідного процесу теплового поля перетворювача

З цього графіка можна зробити висновок, що перетворювач нагрівається протягом тривалого часу. Наприклад, за 30 хвилин конвертер нагрівається до 100 °C, і за 60 хвилин не доходить до усталеного режиму. Тобто маючи інформацію про час розігріву перетворювача та значення температур, які при цьому досягаються, можливо прогнозувати режими роботи, які не загрожують перегріванню та цілісності конструкції перетворювача.

5.5. Експериментальні дослідження температури розігріву стержневого приладу

З метою перевірки відповідності прийнятих допущень та підходів, які використовувались для вирішення сформульованих задач, реальним особливостям конструкцій гідроакустичних приладів були виконані експериментальні дослідження теплових полів цих приладів та проведено їх співставлення з розрахованими даними. Кількість незалежних реалізацій вимірювань була прийнята 3, що забезпечувало середньоквадратичну похибку вимірювань значень температур теплових полів 1 °C при довірчій імовірності 0,95.

На окремому місці експериментальне дослідження температури розігріву працюючого стержневого трьохкомпонентного приладу (типу Ланжевен). Вони здійснюються за допомогою трьох мультиметрів з термопарами, які кріпляться до стержневого перетворювача, вимірюється температура його розігріву в режимі випромінювання звуку. Термопари закріплювались за допомогою термопасти PcCooler GS-1 (має коефіцієнт теплопровідності 8.5 Вт/м·К, густину 2.6 г/см³), що забезпечувало збільшення контактної площі вимірювального датчика та надійну фіксацію. Місця, в яких вимірювали температуру (рис. 5.20)

– середині товщини тильної накладки, п'єзокерамічних елементів та випромінюючої накладки. Напругу на перетворювач подавали від генератора ультразвукових коливань, а для регулювання вихідної потужності генератора напругу на нього подавали через лабораторний автотрансформатор (ЛАТР) з цифровою індикацією. Випромінювання проводили в повітрі. Досліджуваний стержневий перетворювач має дві металеві накладки – тильну, циліндричної форми, та випромінюючу, у формі зрізаного конуса, 2 п'єзокерамічних елемента, армуючий болт та металеві електроди з виводами. Потужність перетворювача 100 Вт, резонансна частота 28 кГц.



Рис. 5.20. Досліджуваний стержневий трьохкомпонентний перетворювач

Експеримент провадився за структурною схемою, зображеною на рисунку 5.21.

Фотографія експериментального стенду наведена на рисунку 5.22.

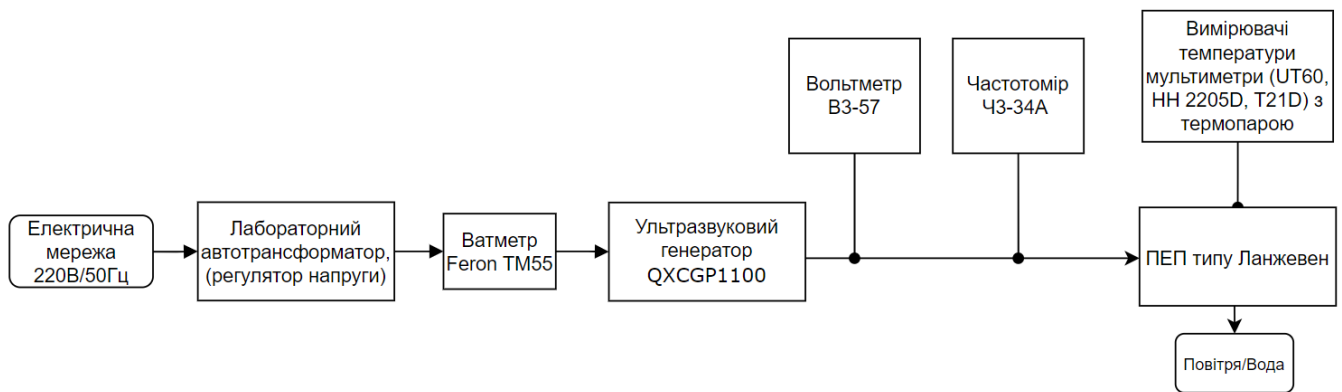


Рис.5.21. Структурна схема експерименту



Рис. 5.22. Експериментальний стенд дослідження температури розігріву приладу

Початкова температура становила 23°C . За 3 хвилини 30 секунд температура на тильній накладці підвищилась до 38.1°C , на п'єзокераміці – до 45°C , на випромінюючій накладці – до 28°C (рис. 5.23)

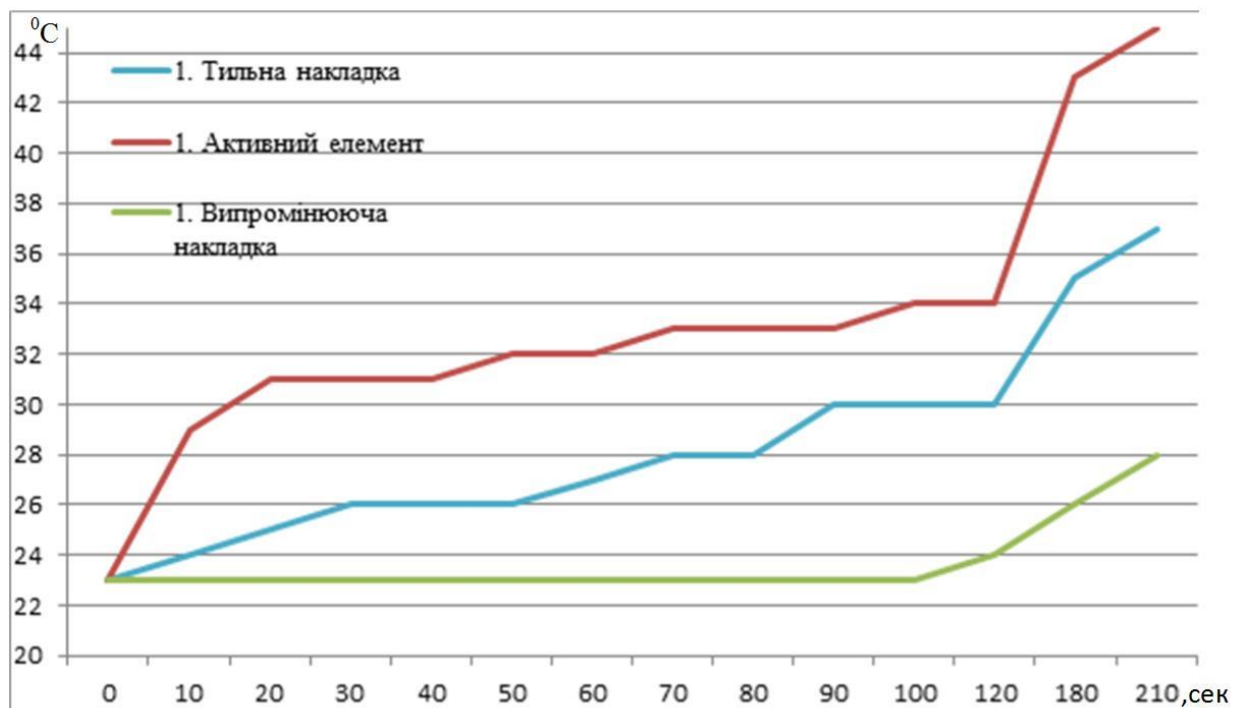


Рис. 5.23. Усереднені по трьом незалежним реалізаціям графіки експериментально виміряної температури

При початковій температурі 30°C , 1 хвилина роботи перетворювача та 2 хвилини у режимі паузи графік залежності температури від часу виглядає наступним чином (рис. 5.24).

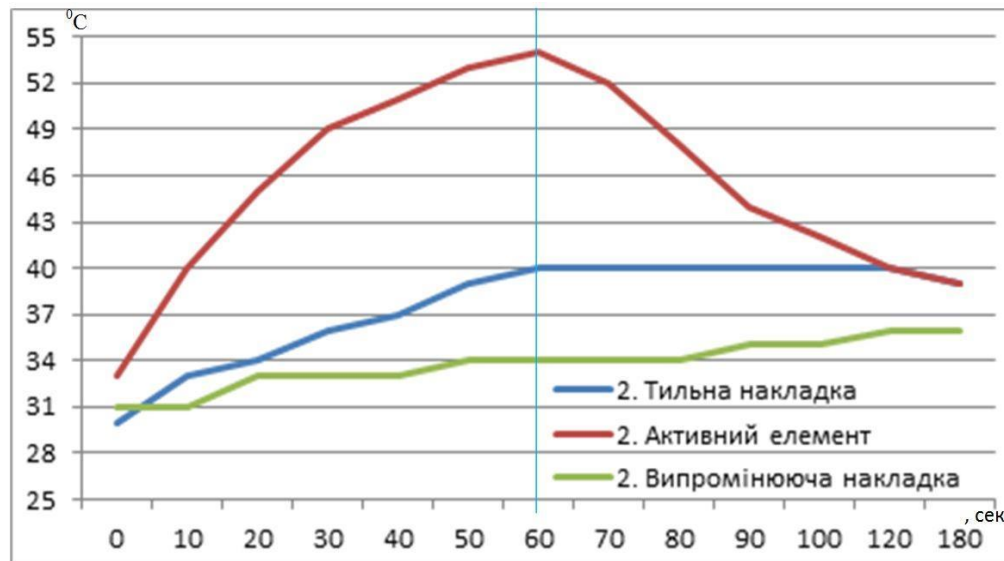


Рис. 5.24. Усереднені по трьом незалежним реалізаціям графіки експериментально виміряної температури при нагріванні та охолодженні

З аналізу графіка можна зробити висновок, що переривчастий режим при відношенні робота/відпочинок, що дорівнює 1/2 не дозволяє перетворювачу остаточно охолонути до початкової температури, а випромінююча та тильна накладки продовжують нагріватись після завершення роботи. Це відбувається за рахунок більшого об'єму цих накладок, різниці теплоємності та коефіцієнтів теплопровідності матеріалів, з яких вони виготовлені, а також інерційності процесів теплопередачі.

На рис. 5.25 наведено усереднені результати проведення 3 незалежних експериментів, при яких час роботи перетворювача становив 1 хвилину з приблизно однаковими початковими температурами.

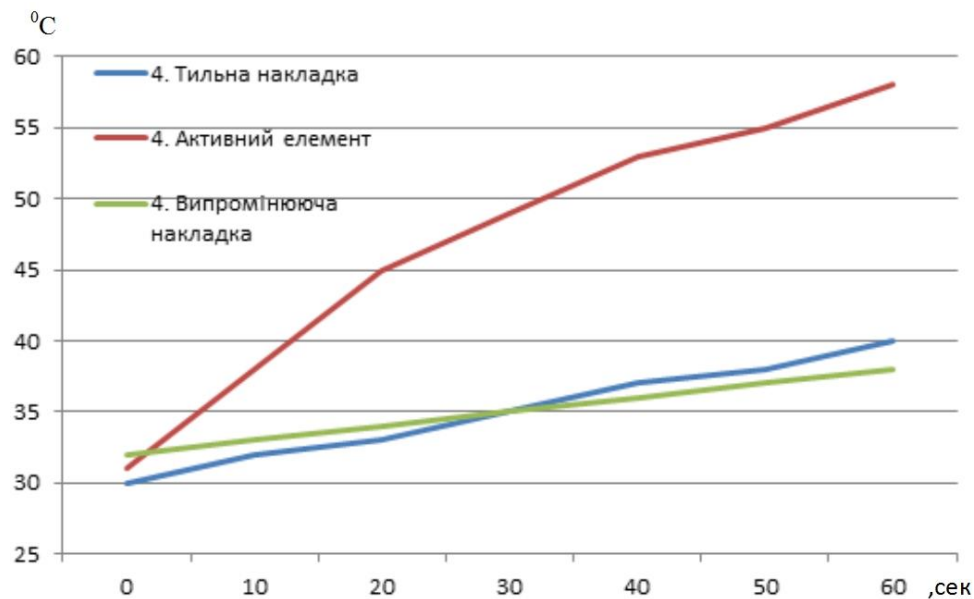


Рис. 5.25. Усереднені по трьом незалежним реалізаціям графіки експериментально виміряної температури

В результаті аналізу результатів експерименту можна зробити висновок, що з кожним разом температура збільшувалась все швидше. Приріст температури за час роботи 1 хвилина після неповного охолодження на п'єзокераміці становить 87%, а для перетворювача кімнатної температури лише 39%. Продовження нагрівання після припинення випромінювання звуку свідчить, що механічна коливальна система має велику теплоємність, а теплові процеси, які в ній відбуваються характеризуються значною інерційністю. Експериментально встановлено, що навіть за наявності додаткового активного охолодження перетворювача, час перерви має бути мінімум в чотири рази більшим за час його роботи.

Крім наведеного був змодельований перехідний процес роботи стержневого перетворювача даної конструкції з потужністю тепловиділення, що становить 15 Вт, за початкової температури 23 °C. Точки на поверхні перетворювача, в яких фіксували температуру (рис. 5.26): середини тильної

накладки – червона лінія (location 1); середина активних елементів – синя лінія (location 2); середина випромінюючого елементу – зелена лінія (location 3).

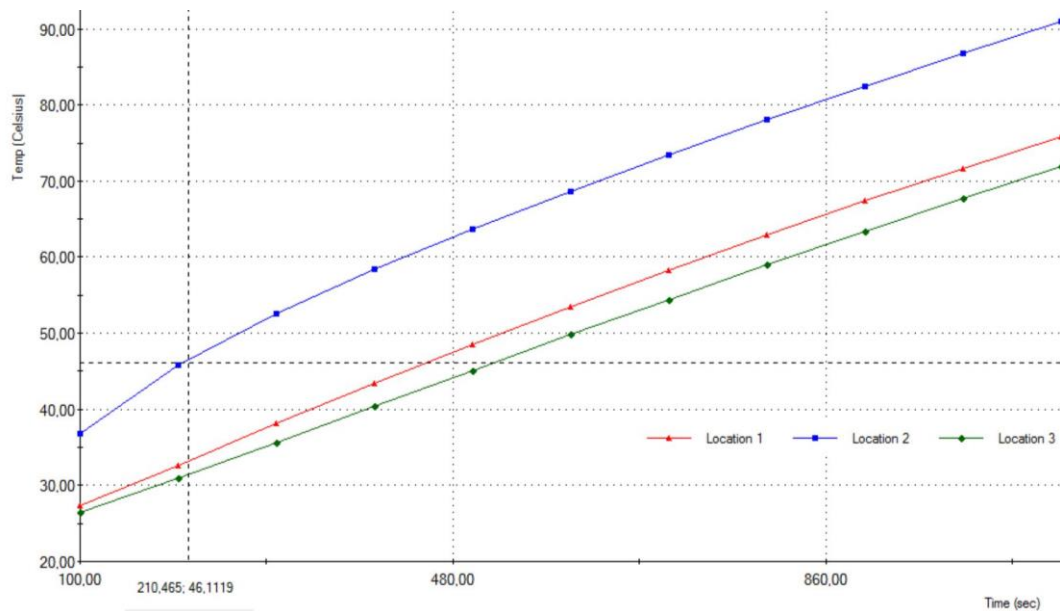


Рис. 5.26. Перехідний процес розігріву конструкції стержневого перетворювача

Результати моделювання показують, що через 3,5 хвилини після ввімкнення температура активного елементу підвищилась до 46°C , тильної накладки – до 33°C , випромінюючої накладки – до 30°C . Порівнюючи з графіком рис. 5.23 різниця між результатами експерименту та моделювання відповідно становить 2,2%, 13,3%, 7%. Найбільшу різницю температури тильної накладки можливо пояснити тим, що фізичні властивості її матеріалу точно не відомі. Співставлення розрахункових і експериментальних кривих свідчить про те, що розроблене в роботі аналітичне забезпечення конструювання гідроакустичних приладів, враховує фізичні особливості їх конструкцій.

5.6. Забезпечення теплового режиму ПЕП конструкційними заходами

Історія конструювання ПЕП має значний досвід пошуку та технічної реалізації вирішення проблеми зменшення температури розігріву конструкцій [160-178]. Серед них:

1. *Підбір конструкційних матеріалів.* Активні елементи з п'єзокераміки є тими елементами конструкції ПЕП, які найчастіше виходять з ладу через теплові навантаження. Надійність конструкції ПЕП, в першу чергу, залежить від її фізико-механічних властивостей, здатності витримувати різні навантаження. Тому в випромінюючих пристроях як активний елемент рекомендується використовувати п'єзокераміку, що володіє високою механічною міцністю, підвищеною стабільністю параметрів в умовах нагріву і високою температурою Кюрі. Також слабкими місцями конструкції є полімерні матеріали (армуючі елементи, прокладки, електроізоляція тощо). Ці елементи також повинні бути виготовлені з матеріалів, які мають відповідну міцність.

2. *Зменшення тепловиділення.* Може бути досягнуто шляхом збільшення добротності механічної коливальної системи конструкції ПЕП, тобто зменшенням її механічних і електричних втрат. Механічні втрати можуть бути зменшені за рахунок забезпечення однорідності (монолітності) коливальної системи і механічного ізолювання від нерухомих частини конструкції перетворювача, наприклад, корпусу. П'єзокераміку слід брати з максимальним значенням механічної добротності Q_m , а для зменшення електричних втрат – з якомога меншим тангенсом кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$.

3. *Застосування схем тепловідводу.* Поширеним способом зниження температури нагріву конструкцій ПЕП є поліпшення відведення тепла від зони максимального нагріву [179-181]. Це досягається за рахунок зменшення теплового опору шляху тепловідведення підвищенням теплопровідності, збільшенням площі відповідного елемента, зменшенням довжини шляху

тепловідведення, застосуванням примусового охолодження рідиною, введення в конструкцію додаткових охолоджуючих елементів. Для конструкцій приладів, з акустичними екранами, покращення тепловідведення від екранованих ділянок поверхні можливо реалізувати виконанням їх у вигляді екранів-хвильоводів із спеціальних звуковідбиваючих гум або металевих еластичних оболонок [179]. Інший спосіб – створити порожнисту конструкцію з робочою рідиною всередині. Такий метод дозволяє збільшити площу прямого контакту випромінюючої поверхні перетворювача з робочим середовищем і тим самим поліпшити процес відведення тепла.

4. *Введення додаткових елементів конструкції* дозволяє знизити термічні навантаження в гідроакустичному приладі. Конструктивна реалізація полягає у введенні проміжних деталей які контактують з п'єзокерамікою та забезпечують поступову зміну температурного коефіцієнту лінійного розширення на границі розділу п'єзокераміка – метал. Такі елементи розв'язки можуть бути виконані із металів (титанових сплавів, сплав НК) або з деполяризованих п'єзокерамічних елементів тих же розмірів. Також зниження температурних напружень в стержневих конструкціях електроакустичних приладів можливо реалізувати застосуванням термокомпенсуючих розв'язок у вигляді тарілчастих пружин. Це дозволить зробити незалежними напруження армування від розігріву активних елементів.

Для зниження температури нагріву будь-якого технічного приладу використовується додаткові охолоджувальні системи.

Особливо гостро питання охолодження електромеханічних приладів акустики постає в медицині (офтальмології, хірургії), де робочі частини цих приладів контактують з тілом пацієнта [182-187]

Як і в будь-якій сфері застосування електронних пристроїв, ці системи можуть бути двох типів – *пасивними* або *активними*. Розглянемо, як вони можуть бути застосовані для охолодження конструкцій ПЕП.

5.6.1. Пасивні методи охолодження

До цих методів охолодження належить застосування різноманітних пасивних тепловідводів та радіаторів. В цьому випадку використовуються природні механізми відведення тепла: конвективна теплопередача, теплопровідність та теплове випромінювання. Пасивні системи охолодження засновані на тому, що установка швидко охолоджує або відводить тепло від більш вразливих компонентів. У цій роботі ми говоримо про ПЕП, тому найбільш вразливим компонентом є саме п'єзокераміка. Цей метод використовується, наприклад, коли неможливо замінити матеріал п'єзокерамічним композитним матеріалом або коли неможливо працювати з зупинкою для охолодження конструкції. Ефективність пасивного методу, тобто швидкість і якість відведення тепла, залежить від площі поверхні тепловіддачі і теплопровідності матеріалів пасивних тепловідводів.

1) Найпоширеніший спосіб пасивного охолодження – застосування охолоджуючих *радіаторів*. Суть цього методу полягає в додаванні чи заміні, де це можливо, зовнішньої оболонки на таку, що має охолоджувальні ребра. Тим самим збільшують площу поверхні компонента, а відтак і площу поверхні з якої відбувається тепловідведення. Чим тонші ребра радіаторів, тим цей метод є ефективнішим.

Застосування охолоджувальних ребер в п'єзокерамічному перетворювачі були запатентовані більше 60 років тому [188]. Автори пропонували використовувати поздовжні зазубрини на тильній накладці. Схожі конструкторські рішення зміни форми тильної накладки описані в [189], де пропонується додати металеву пластину з зазубринами між п'єзокерамічними елементами.

Для зниження температури конструкції не обов'язково застосовувати радіаторні ребра, а достатньо змінити форму накладки (тильної або випромінюючої) на ту, яка має більшу поверхню [151]. Також існують

конструкції перетворювачів, в яких для охолодження зроблені поздовжні отвори в тильній накладці.

2) *Зміна форми випромінюючої або тильної накладки* стержневого приладу. Популярність таких змін пов'язана в першу чергу не зі зниженням максимальної температури нагріву. Збільшення площі поверхні також повинно мати позитивний ефект, але є й інші фактори. Наприклад, збільшення кількості резонансних частот перетворювача [190] або амплітуд. Показано, що перетворювачі з випромінювальною накладкою у вигляді прямокутної пластини, з'єднаної з перетворювачем Ланжевена тонким стрижнем, не має нелінійного ефекту, пов'язаного з підвищенням температури через високу вихідну потужність випромінювання [191].

В роботі досліджено ефективність зниження температури перетворювача шляхом зміни форми тильної накладки. Було запропоновано 3 варіанти форми тильної накладки (рис.5.27), які можуть замінити класичну циліндричну накладку для збільшення тепловідведення. Основний момент, який необхідно враховувати, полягає в збільшенні площі поверхні, але в той же час не в зміні маси і висоти накладки, щоб резонансна частота перетворювача не змінилась. Перший варіант - це охолоджувальні ребра вздовж бічних стінок, другий - вертикальні ребра і циліндричні ребра

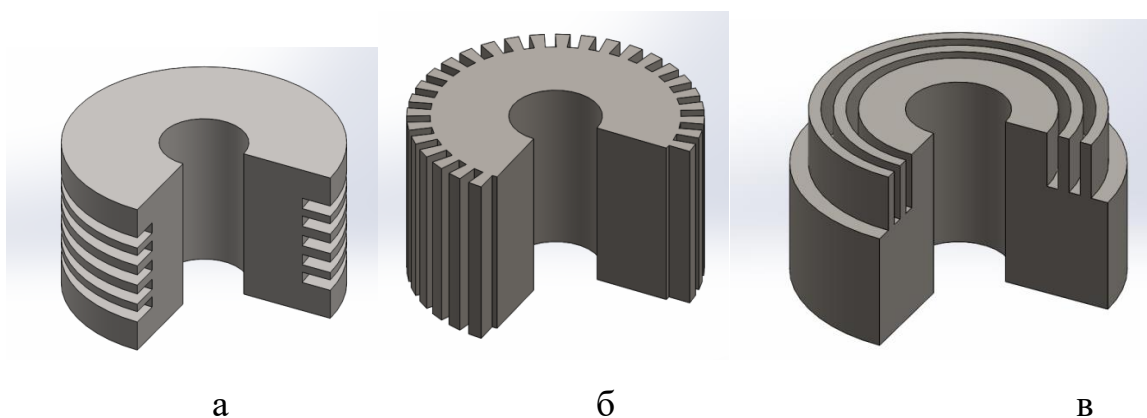


Рис. 5.27. Варіанти форми тильної накладки: *а* – з горизонтальними ребрами; *б* – з вертикальними ребрами; *в* – з циліндричними ребрами

Результати моделювання (рис. 5.28) показали, що запропоновані варіанти *а* та *б* дають ефективність зниження максимальної температури розігріву перетворювача на 15%, а варіант *в* – на 25%.

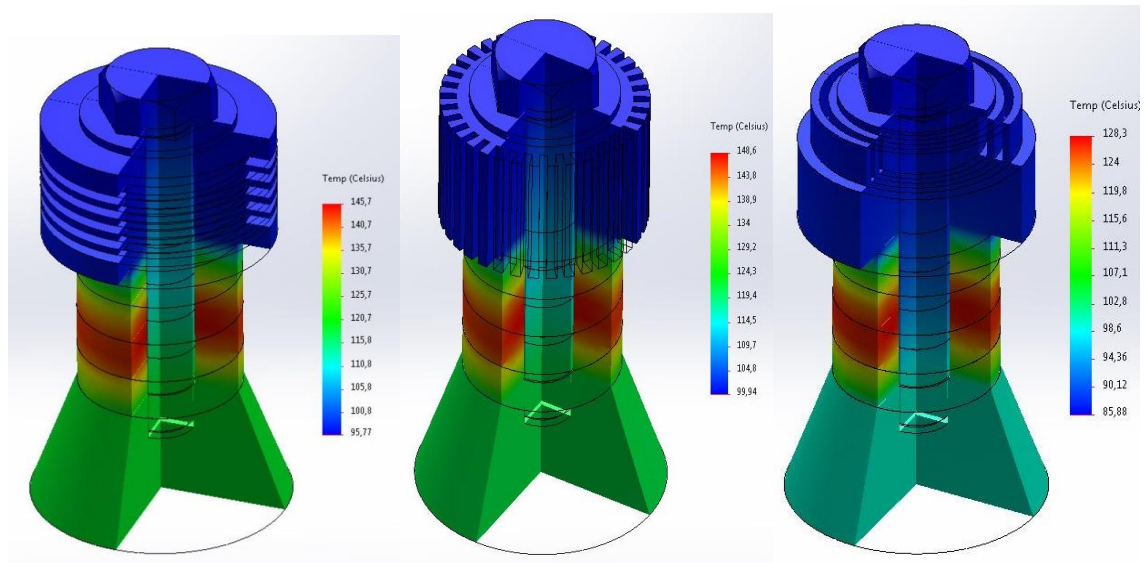


Рис. 5.28. Теплове поле перетворювача зі змінами в тильній накладці: *а* – з радіаторними горизонтальними ребрами; *б* – з вертикальними ребрами; *в* – з циліндричними ребрами

3) *Теплорозсіючі шари* також слід віднести до пасивних методів охолодження [187].

Механізм їх дії полягає в тому, щоб через елементи з більшим коефіцієнтом теплопровідності відвести тепло від нагрітого елемента. Для теплорозсіючих шарів використовують графітові стрічки, алюмінієву або мідну прокладку [187].

У типовій конструкції трикомпонентного стержневого перетворювача положення п'єзокерамічного елемента визначається вузлом поздовжніх коливань, що забезпечує велику амплітуду поздовжніх коливань і високу вихідну потужність пристрою. Але в цьому місці виникає максимальний тепловий потік. У зв'язку з цим, є можливість відокремити п'єзокерамічне кільце додатковою центральною металевою пластиною [192-193]. При цьому виникає ефект зміни максимальної температури нагріву від зміщення активного елемента на вузловий

поверхні коливань за рахунок компенсації довжини накладок при незмінній довжині перетворювача. Отже, при таких замінах перетворювача важливим фактором є також те, чи закріплена нова центральна пластина болтами або може рухатися. У роботі [194] було показано, що з'єднання центральної пластини з болтом збільшує втрати енергії розсіювання перетворювача та збільшує механічні втрати через збільшення тертя з іншими елементами.

Тепловідвідна вставка, яка розміщена між п'єзоелементами дає ряд переваг для зменшення максимальної температури всередині активного елементу. Розглянемо для прикладу застосування мідної вставки. Оскільки додається матеріал (мідь або алюміній) з набагато більшою теплопровідністю ($\lambda_{\text{мідь}} = (300 - 320) \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ до $\lambda_{\text{алюміній}} = (110 - 240) \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) до п'єзокераміки з теплопровідністю в середньому $\lambda_{\text{нк}} = 1.9 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, тому для компенсації теплового розширення матеріалів слід враховувати, що висота вставки $h_{\text{вставка}}$ знаходиться зі співвідношення:

$$\frac{h_{\text{вставка}}}{h_{\text{нк}}} = \frac{(\alpha_c - \alpha_{\text{нк}})}{(\alpha_{\text{вставка}} - \alpha_c)}, \quad \alpha_{\text{вставка}} > \alpha_c,$$

де $h_{\text{нк}}$ - сумарна висота п'єзошайб; $\alpha_{\text{нк}}$ - коефіцієнт лінійного теплового розширення матеріалу п'єзокераміки; α_c - коефіцієнт теплового розширення болтової стяжки; $\alpha_{\text{вставка}}$ - коефіцієнт теплового розширення для вставки з міді.

Орієнтовні значення коефіцієнтів лінійного теплового розширення матеріалів наступні: $\alpha_{\text{сталь}} = (11.5 - 13) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ - для сталі;

$\alpha_{\text{нк}} = (1 - 4) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ - для п'єзокераміки;

$\alpha_{\text{мідь}} = 16.6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ - для міді;

$\alpha_{\text{АМг6}} = 24.7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, - для сплаву АМг6.

В результаті розрахунків отримали, що мідна вставка має бути висотою приблизно від 50 мм до 130 мм, а алюмінієва вставка близько (34-37) мм.

Результати з мідною вставкою є зовсім недоцільними, тому мідь краще підходить для тонких шарів до 2 мм. Розрахунки з алюмінієвою вставкою досить схожі на такі, що можливо застосувати в реальних конструкціях. Застосування додаткових центральних елементів з алюмінієвих сплавів відоме і вже достатньо досліджене, як з урахуванням зміни теплового поля, так зі зміною характеристик перетворювача (амплітуда, резонансна частота). Натомість варіант конструкції з однією тонкою мідною вставкою або іншими реалізаціями мідного прошарку досліджений мало.

Один з можливих варіантів такої реалізації – тонка мідна вставка з діаметром рівним діаметру п'єзокерамічних кілець (рис. 5.29) забезпечує ефективність зниження максимальної температури до 3%.

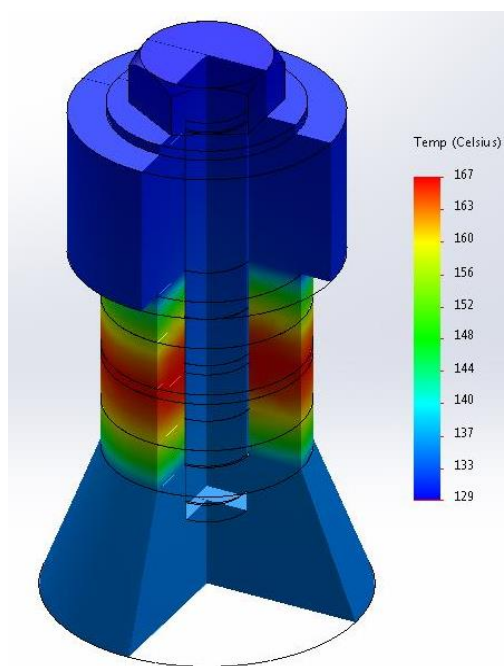


Рис.5.29. Теплове поле ПЕП з тонкою мідною вставкою

Для збільшення площі відведення тепла і охолодження центрального нагрітого елемента є варіант застосування іншої реалізації з використанням мідної вставки у вигляді циліндричної зігнутої пластини (рис. 5.30). Ефективність такого варіанту підвищується до 45%.

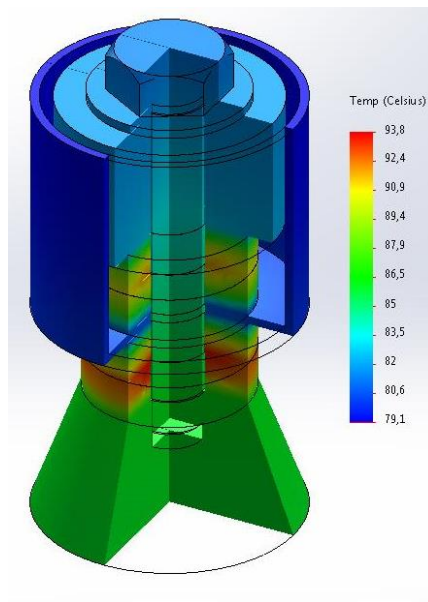


Рис. 5.30. Теплове поле ПЕП з мідною вставкою у вигляді пластини циліндричної форми

4) *Заповнення корпусу ПЕП теплопровідною речовиною*

З методів пасивного охолодження конструкцій стрижневих перетворювачів можна виділити цікаве рішення проблеми нагріву, яке не може бути застосоване до інших типів конструкцій гідроакустичних перетворювачів. Воно полягає в заповненні вільного простору між корпусом перетворювача і його коливальною системою теплопровідною речовиною. Коли ПЕП працює на повітрі, в його корпусі створюється додатковий об'єм, який швидко нагрівається. Корпус використовується для зручності застосування приладу і механічного захисту його конструктивних елементів, таких, як п'єзoelementи та електричні з'єднання. Навіть при наявності великої кількості повітря в корпусі залишаються проблеми з нагріванням [195].

Внутрішній простір корпусу перетворювача можливо використовувати для поліпшення теплового режиму шляхом заповнення газом, електроізоляційною рідиною або спеціальною теплопровідною пастою [196].

Якщо перетворювач не передбачає виконання ремонтів, його заповнюють компаундами. В цьому випадку внутрішній простір пропонується заповнити сумішшю наповнювача і теплопровідного порошку (термопастою). Можливо ще використовувати шар спеціальної суміші для відводу тепла від корпусу перетворювача. Цей матеріал слід заливати між п'єзокерамікою та корпусом. Як теплопровідний порошок пропонується використовувати порошок, що складається з нітриду алюмінію, нітриду бору, міді або срібла. Як наповнювач використовується силіконова або електроізоляційна гума, в залежності від типу порошку. Абразивні властивості порошку не впливають на п'єзокераміку, нейтралізуючись силіконовою начинкою. Коефіцієнт теплопровідності і твердість по Шору визначаються тільки експериментально, тому процес створення нового матеріалу повинен включати в себе кілька тестів [197]. На це сильно вплине розмір і співвідношення металу і силікону. Теплопровідність порошкоподібного тіла сильно залежить від його густини. Тому для подальшого застосування слід орієнтуватись на вже відомі матеріали, що володіють аналогічними властивостями – термопастах. Наприклад характеристики термопасты з алюмінієм Prolimatech PK-1: густина – 3200 кг/м^3 , коефіцієнт теплопровідності – $\lambda_{\text{термопаста}} = 10.2 \text{ Вт / м} \cdot \text{К}$.

Використання герметичного корпусу часто є необхідною умовою побудови конструкції ПЕП. Але заповнення його тільки повітрям небажане, оскільки є ймовірність електричного пробоя. В цьому плані перевагу має заповнення корпусу матеріалом, який зменшує максимальну температуру нагріву. При цьому зменшення температури розігріву п'єзоелементів забезпечується збільшенням коефіцієнту теплопровідності її оточуючого середовища, тобто перенесенням тепла на корпус конструкції перетворювача.

Найчастіше заповнення корпусу відбувається електроізоляційною рідиною, коефіцієнт теплопровідності якої становить

$\lambda_{\text{ел.-із.рідина}} = 0.17 \text{ Вт / м} \cdot \text{К}$. Також корпус часто заповнюють інертним газом. Але тут потрібно враховувати теплопровідність цього газу, наприклад, у неону коефіцієнт теплопровідності становить $\lambda_{\text{неон}} = 0.0493 \text{ Вт / м} \cdot \text{К}$. Якщо порівняти це значення з коефіцієнтом теплопровідності повітря – $\lambda_{\text{повітря}} = 0.026 \text{ Вт / м} \cdot \text{К}$, то можна розраховувати виграш в максимальній температурі нагріву. Застосування ксенону з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_{\text{ксенон}} = 0.0057 \text{ Вт / м} \cdot \text{К}$ тільки погіршить ситуацію. Найпоширенішим є заповнення внутрішнього об'єму елегазом, через його гарні електроізоляційні властивості, але він має низький коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{\text{SF}_6} = 0.0136 \text{ Вт / м} \cdot \text{К}$. Звідси витікає, що для конструкцій перетворювачів, у яких потрібно знизити температуру нагрівання, таке заповнення є конструктивно невдалим.

Більшість рідин мають невелике значення коефіцієнту теплопровідності $0,09 \dots 0,7 \text{ Вт / м} \cdot \text{К}$. У більшості рідин також коефіцієнт теплопровідності зменшується зі збільшенням температури. В той же час, як гази, так і пари погано проводять теплоту ($0,006 \dots 0,58 \text{ Вт / м} \cdot \text{К}$), а коефіцієнти теплопровідності газів збільшуються з ростом температури.

Розглянемо випадок розміщення тонкого шару термопаст, навколо активного елемента (рис. 5.31). Ефективність такого варіанту важко прорахувати, оскільки існує багато різних виробників термопаст, різних за своєю структурою (однорідність, пластичність, застигання). Встановлено, що даний варіант забезпечує ефективність зниження температури приблизно до 12%.

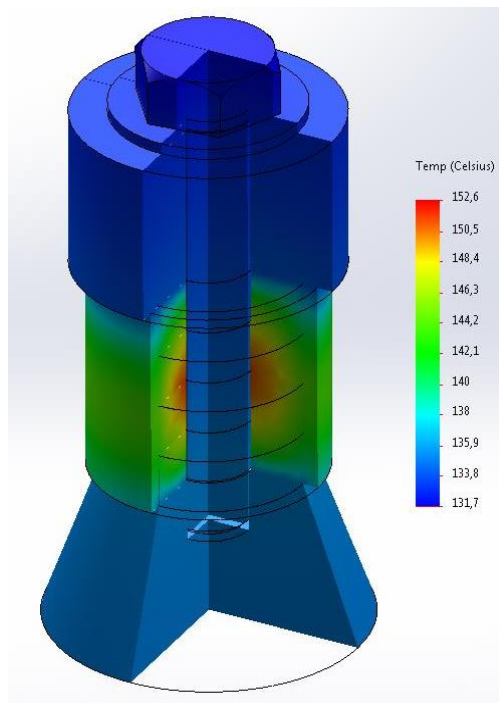


Рис.5.31. Теплове поле перетворювача з теплорозсіюючим шаром

В результаті виконаних досліджень побудована діаграма ефективності зменшення максимальної температури нагріву конструкції стержневих перетворювачів при, застосуванні пасивних методів охолодження (рис. 5.32):

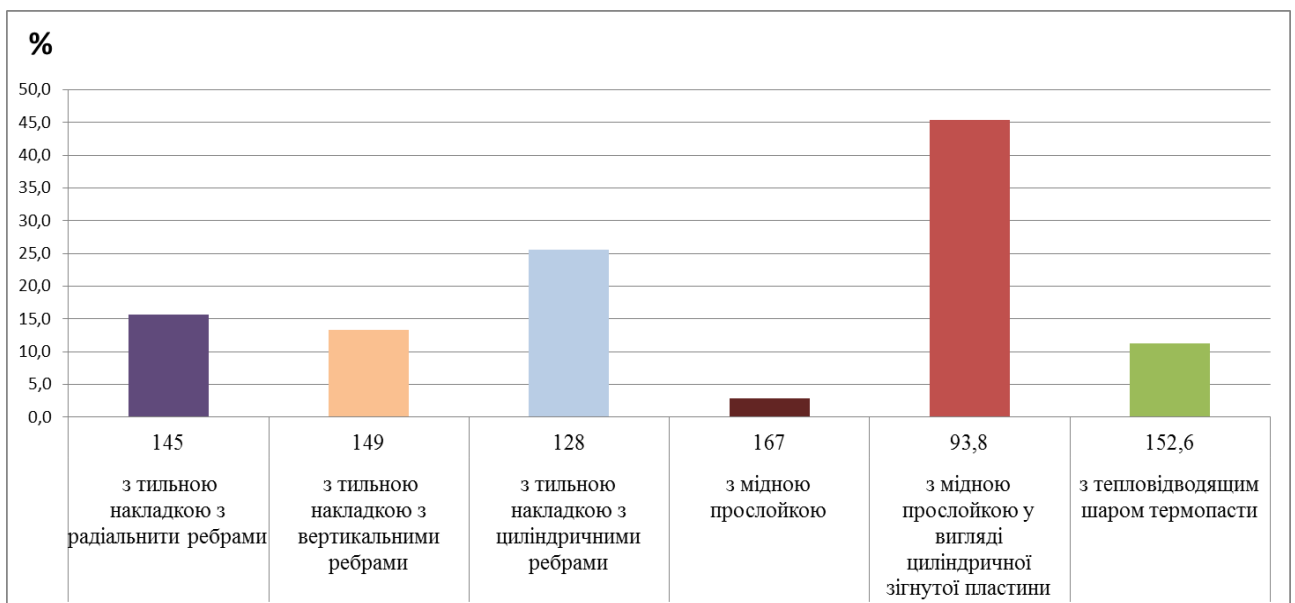


Рис.5.32. Діаграма ефективності застосування пасивних методів охолодження

Як бачимо, при зміні форми тильної накладки на накладку з ребрами (радіатор), ефективність тепловідведення не збільшиться пропорційно збільшенню площі поверхні. Завдяки великій площі контакту з навколишнім середовищем, високої теплопровідності і вдалому розташуванню між п'єзокерамічними кільцями мідна вставка у вигляді циліндричної зігнутої пластини володіє високою ефективністю.

5.6.2. Активні методи

До активних методів охолодження відносяться ті, що вимагають використання додаткової потужності, тобто вентилятора, компресора або термоохолоджувача. Вони підвищують масогабаритні характеристики конструкції. З активних методів охолодження найчастіше використовується метод продування повітрям або газом [193] або примусове рідинне охолодження [197]. Ці методи дуже ефективні, але вимагають суттєве ускладнення конструкції.

Примусова конвекція здійснюється за рахунок обдування вентилятором. В даний час існують вентилятори, мінімальні розміри яких становлять 2 см², але навіть вони не завжди можуть бути оптимальним варіантом вибору метода охолодження для ПЕП. Ефективність повітряного охолодження оцінюється з наступного співвідношення:

$$\alpha = 5.6 + 4v, \quad \text{W/(m}^2 \cdot \text{K)},$$

де v - швидкість руху повітря. Як бачимо, чим більша швидкість обдування, тим більше тепла з поверхні (перетворювача) зможе перейти в навколишнє середовище.

Слід зазначити, що повітря або газ, який використовується для обдуву вимагає певних параметрів: він повинен бути холодним і сухим, і для цього має бути застосоване додаткове охолодження, яке може бути не вигідним для

безперервної роботи перетворювача, особливо при високій продуктивності. Існують також обмеження пов'язані з герметичністю конструкції, оскільки для обдування нагрітих елементів потрібні вхідний і вихідний отвори в корпусі.

Для рідинного охолодження тепловіддача є набагато ефективнішою. Тепловіддача від металевої стінки в рідину оцінюється з наступного співвідношення:

$$\alpha = 350 + 2100\sqrt{v}, \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

де v - швидкість руху рідини. Рідинне охолодження має і свої недоліки. Так, слід продумати відведення нагрітої охолоджуючої рідини, так як вона також може заважати роботі і собою нагрівати робоче середовище [198]. Також важливо продумати зберігання цієї самої рідини, адже для потужного промислового приладу з вихідною акустичною потужністю в воду до 3 кВт, потрібно 5 л / хв. охолоджуючої рідини.

Висновки до розділу 5

Досліджено два підходи до створення розрахункового забезпечення конструювання гідроакустичних приладів в частині їх теплової міцності – аналітичний та з допомогою моделювання.

Аналітичний підхід базується на розв'язанні рівняння теплопровідності і дозволяє знайти аналітичні співвідношення для визначення теплових полів, створюваних конструкціями цих приладів. Показано, що його перевагою є можливість отримання інформації для фізичної інтерпретації отриманих результатів.

Моделювання теплових полів конструкцій гідроакустичних приладів базується на ряді комп'ютерних програм. Здійснено пошук, розгляд та співставлення між собою як цих програм, так результатів роботи з ними.

Показано, що перевагою моделювання є можливість розрахунку теплових полів більш складних конструкцій гідроакустичних приладів.

Встановлено, що при співставленні розрахунків обома методами, результати співпадають.

Виконані розрахунки теплових полів, створюваних гідроакустичними приладами у вигляді циліндричних перетворювачів силової і компенсованої конструкцій. Визначені особливості цих полів для кожного з типів цих приладів.

Виконані експериментальні дослідження теплових полів конструкцій гідроакустичних приладів у вигляді стержневих перетворювачів. Встановлена задовільна відповідність теоретичних і експериментальних даних, що підтверджує адекватність прийнятих розрахункових моделей для визначення теплових полів реальним конструкціям гідроакустичних приладів.

Встановлено, що шляхи зменшення тепловиділення конструкцій гідроакустичних приладів є пасивними і активними. Проаналізовані існуючі і запропоновані нові технічні шляхи реалізації зменшення температури розігріву в конструкціях гідроакустичних приладів. Встановлено, зокрема, що для конструкцій гідроакустичних приладів у вигляді стержневих перетворювачів найбільш ефективними способами відведення тепла є створення конструкцій з мідною вставкою в активному елементі (зниження температури нагрівання на 45%) та варіант з тильною накладкою у вигляді циліндричних ребер (зниження температури нагрівання на 25%).

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну проблему розробки теоретичних основ розрахунку та фізико-технічних засад конструювання електромеханічних приладів акустики пружних середовищ з урахуванням наслідків взаємодії в їх конструкціях фізичних полів 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. В процесі виконання дисертаційної роботи автором особисто отримані наступні наукові результати:

1. Вперше при розробці електромеханічних приладів акустики пружних середовищ запропоновано розглядати їх як частину складної механічної коливальної системи, до якої входять елементи конструкції електромеханічного приладу акустики та оточуючі пружні середовища. Досліджено вплив розміщення елементів конструкції приладу в просторі, форми елементів, характеристик середовищ на взаємодію фізичних полів і процесів, що виникають в цій системі при перетворенні і просторовому формуванні енергії. Ці взаємодії призводять до появи в даній коливальній системі нових додаткових резонансних режимів, втрати одномодовості і набуття багатомодовості конструкціями електромеханічних приладів акустики. Як наслідок - суттєво збільшуються їх електричні, механічні та акустичні навантаження, які є визначальними при розробці конструкцій багатомодових приладів.

2. Вперше показано, що характер електричного збудження значно впливає на характеристики електричних, механічних і акустичних полів в конструкціях багатомодових приладів акустики пружних середовищ. Шляхом дослідження

частотно-незалежних, частотно-залежних і змішаних видів електричного збудження встановлено, що навантаження конструкцій багатомодових приладів значно зростають порівняно з одномодовими. Поява додаткових низькочастотних резонансів розширює діапазон механічних навантажень в 2-4 рази, а амплітуд їх зміщень або коливальних швидкостей – в 3-8 разів в залежності від частоти додаткових резонансів. Тому врахування характеру електричного збудження має бути визначальним елементом процесу конструювання багатомодових електромеханічних приладів акустики пружних середовищ.

3. Вперше встановлено, що у випадку збудження багатомодових приладів частотно-незалежними електричними сигналами, основним параметром, який визначає їх конструктивну міцність є механічна складова. Показано, що при такому збудженні багатомодових конструкцій в області низьких частот з'являються додаткові резонанси, які мають в 3-6 разів (в залежності від частоти додаткового резонансу) більші механічні навантаження у вигляді зміщення або коливальної швидкості, порівняно з одномодовими приладами. У зв'язку з цим удосконалено методи кількісної оцінки їх статичної та динамічної механічних міцностей та створено розрахункове забезпечення конструювання. При цьому вперше вибір характеристик конструкційних матеріалів і розмірів деталей конструкцій здійснювався з урахуванням кількісних значень конкретних діючих навантажень, схем побудови конструкцій та технологій їх виготовлення, міри випромінюваної питомої потужності, питомого хвильового опору п'єзокераміки, навантаженості приладу та його форми коливань, тривалості прикладення напружень, кількості їх знакозмінних циклів та наявності в п'єзокераміці різних концентраторів напружень та дефектів. Для збільшення динамічної міцності конструкцій шляхом армування визначена діаграма граничних циклів навантаження п'єзоелементів та отримані аналітичні розрахункові

співвідношення. Встановлено, що збільшення відносних армуючих напружень більш ніж в 2 рази дозволяє більш, ніж в 2 рази збільшити амплітуди робочих напружень.

4. Вперше встановлено, що при електричному збудженні багатомодових приладів частотно-залежними сигналами конструктивна міцність приладів визначається їх електричною міцністю. Показано, що характеристики міцності конструкцій приладів визначаються опором електричних втрат в елементах електроізоляції і герметизації, їх електричною ємністю і тангенсом кута діелектричних втрат. Встановлено, що останні величини залежать від: рівня концентрації парів рідини в конструкціях електроакустичних приладів; відносної вологості; питомого електричного опору, температури і робочої частоти, застосованих керамічних та полімерних електроізоляційних матеріалів. Запропоноване розрахункове забезпечення конструювання електроакустичних приладів в частині електричної міцності шляхом розв'язку рівнянь дифузії. Отримані аналітичні вирази для розрахунків вологостійкості активних елементів в конструкціях багатомодових приладів. Встановлено, що для конструкцій зі складами п'єзокераміки ЦТС (PZT) при відносній вологості $\varphi = 60 - 90 \%$ питомий електричний поверхневий опір становить $r_0 = 10^{11} - 10^9$ Ом відповідно. Нанесення на поверхню елементів лаків на основі епоксидних смол або поліуретану при тих же значеннях відносної вологості збільшує поверхневий опір до $r_0 = 10^{13} - 10^{11}$ Ом.

5. З урахуванням наслідків взаємодії в конструкціях багатомодових приладів фізичних полів різної природи в частині аналізу теплових навантажень вперше запропоновано і розвинуто два методи – аналітичний і комп'ютерного моделювання. Для ряду конструкції електроакустичних приладів у вигляді циліндричних і стержневих перетворювачів визначені розподіли температурних

полів по об'єму їх конструкцій. Показані технічні шляхи зменшення теплових навантажень конструкцій багатомодових приладів шляхом застосування: радіаторів різного виду; тепловідвідних вставок; інертних газів, електроізоляційних рідин або термопаст, які заповнюють внутрішній простір конструкцій. Встановлено, що застосування пасивних шляхів дозволяє збільшити теплопровідність конструкцій приладів в 2-5 разів, зокрема при використанні неону порівняно з повітрям з 0,026 Вт/(м·К) до 0,0493 Вт/(м·К). Це дозволяє зменшити температуру в 1,5 – 2 рази та збільшити час розігріву конструкцій.

6.Експериментальні дослідження, проведені в роботі, підтверджують відповідність теоретичних результатів, отриманих аналітичними методами, реальним особливостям конструкцій багатомодових приладів акустики.

7.Результати, отримані в роботі, дозволили створити фізико-технічні засади конструювання багатомодових приладів. Вони надають можливість обирати характер електричного збудження, виходячи з вимог забезпечення всіх видів міцності конструкції, та існуючих можливостей реалізації збудження; містять методи і методики кількісного визначення електричної, механічної та теплової міцностей розроблюваних конструкцій, а також дозволяють порівнювати варіанти конструкцій багатомодових приладів акустики і за потреби змінювати їх складові ще на етапі конструювання.

8.Результати дисертації впроваджено в навчальний процес КПІ імені Ігоря Сікорського та проектні роботи ДП «Київський науково-дослідний інститут гідропріладів», що підтверджено відповідними актами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дідковський В. С., Лейко О. Г., Савін В. Г. Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання): навч. посіб. – Кіровоград: Імекс-ЛТД, 2006. – 448 с.
2. Grinchenko V. T., Vovk I. V. Low-Frequency Transducer Technology in Ukraine // In: Diachok O., Caiti A., Gerstoft P., Schmidt H. (eds) Full Field Inversion Methods in Ocean and Seismo-Acoustics. – Modern Approaches in Geophysics, vol. 12. – Springer, Dordrecht, 1995. – https://doi.org/10.1007/978-94-015-8476-0_34.
3. Дідковський В. С., Порошин С. М., Лейко О. Г., Лейко А. О., Дрозденко О. І. Конструювання електроакустичних приладів і систем для мультимедійних акустичних технологій: навч. посіб. – К.: НТУУ "КПІ", 2013. – 390 с.
4. Дрозденко О. І., Дрозденко К. С., Лейко О. Г. Конструювання п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів. Урахування експлуатаційних навантажень: монографія. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 157 с. – ISBN 978-613-5-82752-1.
5. Sharapov V., Sotula Zh., Kunickaya L. Piezo-electric electro-acoustic transducers. – Springer, 2014. – ix, 230 p. – (Microtechnology and MEMS). – ISBN 978-3-319-01198-1.
6. Butler J. L., Sherman C. H. Transducers and Arrays for Underwater Sound. – 2nd ed. – Springer International Publishing, Switzerland, 2016.
7. Pavelko I. Research on the protection of piezoceramic transducers from the destruction by mechanical loading / I. Pavelko // Machines, Technologies, Materials: International Virtual Journal. – 2010. – № 7. – P. 17–21.
8. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкостях // Физическая акустика / Под ред. У. Мезона. – М.: Мир, 1967. – Т. 1, Ч. Б. – С. 7–138.

9. Лейко А. Г., Шлипченко Ю. З. О влиянии ультразвуковой кавитации в ограниченных объемах на импеданс преобразователей // Акустичний вісник. – 1998. – Т. 1, № 1. – С. 52–57.
10. Bregliozzi G., Di Schino A., Haefke H. Cavitation erosion resistance of a high nitrogen austenitic stainless steel as a function of its grain size // Journal of Materials Science Letters. – 2003. – Vol. 22. – P. 981–983.
11. Sriraman, M. R., Vasudevan, R. Influence of ultrasonic cavitation on surface residual stresses in AISI 304 stainless steel // Journal of materials science letters. – 1998. – Vol. 33. – P. 2899–2904.
12. Дудзинський Ю. М. Кавітаційна ерозія в ближньому полі осесиметричного гідродинамічного випромінювача / Ю. М. Дудзинський // Акустичний вісник. – 2005. – Т. 8, № 4. – С. 46–50.
13. Дрозденко О. І. Критерій для оцінки потенційних кавітаційних можливостей електроакустичних перетворювачів, що працюють у рідині / О. І. Дрозденко // Електроніка і зв'язок. – 2009. – № 6(53). – С. 26–30.
14. Дрозденко О. І. Інженерні заходи щодо зменшення впливу акустичної кавітації на випромінюючу поверхню п'єзоелектричних перетворювачів та тракт випромінювання в цілому / О. І. Дрозденко // Електроніка і зв'язок. – 2010. – № 6(59), ч. 2. – С. 139–146.
15. П'єзоелектричні датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусієнко, Є. В. Шарапова [та ін.] ; за ред. В. М. Шарапова. – Черкаси: ЧДТУ, 2006. – 632 с.
16. Шарапов В. М., Мінаєв І. Г., Бондаренко Ю. Ю. П'єзоелектричні перетворювачі: Довідковий посібник. – Черкаси: ЧДТУ, 2004. – 435 с.
17. Guyomar, J. P., Badel, S., Lefeuvre, A., Richard, E. Piezoelectric sensors and actuators: Fundamentals and applications. – Springer, 2008.

18. Жуков С. Н. (пер.) П'єзоелектрична кераміка: принципи і застосування. – К: ФУАінформ, 2003. – 112 с.
19. Гринченко В. Т., Вовк І. В., Маципура В. Т. Основы акустики: навч. посіб. – Київ: Наукова думка, 2009. – 867 с. Гринченко В. Т. Волновые задачи акустики: монография / В.Т. Гринченко, И. В. Вовк, В. Т. Маципура. – К.: Интерсервис, 2013. – 572 с.
20. Гринченко В. Т., Дідковський В. С., Маципура В. Т. Теоретические основы акустики : учеб. пособ. – К. : ИЗМН, 1998. – 376 с.
21. Sherman C. H., Butler J. L. Transducers and Arrays for Underwater Sound. – New York : Springer, 2007.
22. Marage J.-P., Mori Y. Sonar and Underwater Acoustics. – Wiley, 2010. – 618 p.
23. Beranek L. L., Mellow T. J. Acoustics: Sound Fields and Transducers. 1st ed. – Academic Press, Elsevier Inc., 2012. – XV, 704 p. – ISBN 978-0-12-391421-7.
24. Гусак З. Т., Лейко А. Г. Физические поля гидроакустической антенны, состоящей из уголкового рупора и пьезокерамического излучателя с окружной поляризацией // Электроника и связь. – 2014. – Т. 19, № 1. – С. 102–108.
25. Гусак З. Т., Лейко А. Г. Поле излучения уголковой рупорной антенны с пьезокерамическим преобразователем с радиальной поляризацией // Электроника и связь. – 2014. – Т. 19, № 2. – С. 75–81.
26. Гусак З. Т., Лейко А. Г. О частотных характеристиках электрических полей цилиндрической пьезокерамической антенны с экраном в виде незамкнутого кольцевого слоя // Журнал нано- та електронної фізики. – 2016. – Т. 8, № 1, 01029. – С. 1–6.
27. Гусак З. Т. Свойства механических полей экранированных гидроакустических излучателей компенсированной конструкции в

- зависимости от параметров экрана // Сб. тр. акуст. симпоз. КОНСОНАНС-2015. – 2015. – С. 72–77.
28. Акустичні антени / В. С. Дідковський, С. М. Порошин, О. В. Коржик [та ін.]. – К. : НТУУ «КПІ», 2014. – 244 с.
29. Melenko U. Y. An approach to the construction of circular cylindrical piezoceramic transducers // Electronics and Communications. – 2012. – Vol. 5 (70). – P. 36–40.
30. Melenko U. Y. On one of the ways to control the resonant frequency of circular cylindrical transducer // Electronics and Communications. – 2013. – Vol. 2 (73). – P. 63–68.
31. Korzhyk O. V. To the boundary conditions for problem of sound receiving by spherical electroelastic transducer with disconnecting electrodes // Electronics and Communications. – 2012. – Vol. 5 (70). – P. 30–35.
32. Коржик А. В., Филиппова Н. Ю. Постановка и решение задачи о приеме звука цилиндрическим электроупругим преобразователем с полностью электродированной поверхностью, размещенном в замкнутом волновом слое // Электроника и связь. – 2012. – № 1. – С. 18–24.
33. Плєскач М. Г., Лєйко О. Г. Випромїнення звуку цилїндричним п'єзокерамічним перетворювачем, розміщеним в шарї звукопрозорого матеріалу // Електроника и связь. – 2010. – № 4. – С. 175–179
34. Дрозденко А. И., Лєйко А. Г. Излучение максимальной акустической мощности системами гидроакустических цилиндрических пьезокерамических преобразователей с окружной поляризацией // Microsystems, Electronics and Acoustics. – 2018. – Vol. 23, No. 2. – P. 58–65. – Режим доступа: <http://elc.kpi.ua/article/view/121316>, DOI: 10.20535/2523-4455.2018.23.2.121316.
35. Дерєпа А. В., Джаназян В. В., Лєйко О. Г., Дрозденко О. І. Сучасні підходи до конструювання гідроакустичних антен корабельних

- гідроакустичних станцій // Озброєння та військова техніка. – 2019. – № 2(22). – С. 93–98.
- 36.Лейко А., Нижник А., Богданова Н. Особенности электромеханического преобразования энергии цилиндрическим пьезокерамическим излучателем в составе системы излучателей // Българско списание за инженерно проектиране. – 2016. – № 29 (квітень). – С. 15–22.
- 37.Лейко О. Г., Старовойт Я. І. Частотні властивості електричних полів циліндричної системи п'єзокерамічних випромінювачів з екраном у внутрішній порожнині // Журнал нано- та електронної фізики. – 2016. – Т. 8, № 4. – С. 04018-04018-6. – DOI: 10.21272/jnep.8(4(1)).04018.
- 38.Vovk I. V., Oliynik V. N. Sound radiation by a cylindrical piezoelastic shell with an asymmetric insertion // Journal of the Acoustical Society of America. – 1996. – Vol. 99. – P. 133–138.
- 39.Vovk I. V., Grinchenko V. T., Oliynyk V. N. On the method of construction of a directed low-frequency hydroacoustic radiator // Proceeding of the 2nd European Conference on Underwater Acoustics, Lyngby, Denmark, 4–8 July, 1994. – P. 573–578.
- 40.Дрозденко О. І., Дерепя А. В., Лейко О. Г., Святненко А. О. Механічна міцність гідроакустичних циліндричних випромінювачів з внутрішніми екранами // Озброєння та військова техніка. – 2019. – № 3 (23). – С. 110–116. – DOI: 10.34169/2414-0651.2019.3(23).110-116.
- 41.Bogdanova N. V., Leiko A. G., Naida S. A., Drozdenko A. I. Cylindrical piezoceramic radiator as a complex dynamic system // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2019. – Vol. 11, No. 6. – P. 06011-1 – 06011-7.
- 42.Leiko O., Bogdanova N., Bogdanov O., Drozdenko O., Drozdenko K. Possibilities of controlling the dynamic properties of a cylindrical piezoceramic acousto-electronic device with two-frequency resonance // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2020. – Vol. 12, No. 6. – P. 06003.

- 43.Лейко А. Г., Нижник А. І. Фізичні поля планарних гідроакустичних антен, утворених з циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів // Електроніка та зв'язок : науково-технічний журнал. – 2015. – Т. 20, № 2(85). – С. 100–106.
- 44.Лейко А. Г., Нижник А. І., Старовойт Я. І. Акустичні властивості циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів силової і компенсованої конструкції з поздовжнім і поперечним п'єзоефектами // Електроніка і зв'язок. – 2013. – № 6. – С. 62–73.
- 45.Лейко А. Г., Шамарін Ю. Є., Ткаченко В. П. Підводна електроакустична апаратура і пристрої. Т. 1. Підводні акустичні антени. Методи розрахунку звукових полів. – Київ, 2000. – 320 с.
- 46.Основи військово-технічних досліджень. Теорія і застосування: монографія: у 7 т. Т. 7. Комплексна система «гідроакустичне озброєння – надводний корабель». Проблемні аспекти системи «гідроакустична станція – надводний корабель» з антенами, розміщеними в корпусі корабля / А. В. Дерепи, О. Г. Лейко, Ю. Я. Меленко; за ред. А. В. Дерепи. – К. : Видавничий дім Дмитра Бураго, 2014. – 424 с.
- 47.Основи військово-технічних досліджень. Теорія і застосування: монографія: у 8 т. Т. 8. Комплексна система «гідроакустичне озброєння – надводний корабель». Проблемні аспекти системи «гідроакустична станція – надводний корабель» з антенами змінної глибини / А. В. Дерепи, О. Г. Лейко, Ю. Я. Меленко; за ред. А. В. Дерепи. – К. : Видавничий дім Дмитра Бураго, 2016. – 400 с.
- 48.Гринченко В. Т., Лунева С. А. Звуковое поле экранированного кругового цилиндра // Акустический журнал. – 1980. – Т. 26, № 3. – С. 462–466.
- 49.Лейко А. Г., Нижник А. И., Старовойт Я. И. К вопросу об излучении звука цилиндрическими пьезокерамическими преобразователями

- различной конструкции // Электроника и связь. – 2014. – № 1. – С. 81–94.
- 50.Святненко А. О. Циліндричні п'єзокерамічні випромінювачі з внутрішніми екранами: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.08 – прикладна акустика та звукотехніка / Святненко Андрій Олегович. – Київ, 2020. – 235 с.
- 51.Коржик А. В. Гидроакустические устройства на основе многомодовых пьезокерамических преобразователей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.08 / Алексей Владимирович Коржик. – Київ, 2011. – 385 с.
- 52.Дерепа А. В., Лейко О. Г., Дрозденко О. І., Святненко А. О. Властивості гідроакустичних випромінювачів з внутрішніми екранами в залежності від характеристик екранів // Озброєння та військова техніка. – 2020. – № 1 (25). – С. 89–95. DOI: 10.34169/2414-0651.2020.1(25).89-95.
- 53.Шендеров Е. Л. Волновые задачи гидроакустики / Е. Л. Шендеров. – Л. : Судостроение, 1972. – 352 с.
- 54.Подводная электроакустическая аппаратура и устройства. Т. 2. Технология акустических антенн. Методы изготовления с применением электрофизических приемов обработки / Ю. Е. Шамарин, А. Г. Лейко, А. Ю. Шамарин, В. П. Ткаченко. – К. : Аванпостприм, 2001. – 256 с.
- 55.Гринченко В. Т., Улитко А. Ф., Шульга Н. А. Механика связанных полей в элементах конструкций в 5-ти томах / под общ. ред. А. Н. Гузя. – К. : Наук. думка, 1989. – Т. 5. – 280 с.
- 56.Лейко А. Г., Нижник А. И., Старовойт Я. И. Звуковые поля пьезокерамических излучателей с различным пьезоэффектом // Электроника и связь. – 2013. – № 5. – С. 50–55.
- 57.Лейко А. Г., Нижник А. И., Старовойт Я. И. Электрические свойства цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и

- компенсированной конструкции с окружной поляризацией // Электроника и связь. – 2014. – № 3. – С. 62–72.
58. Коржик А. В. Амплитудно-частотные характеристики некоторых форм колебаний пьезокерамических цилиндрических приемников звука при различных видах электродирования в условиях связанности // Акустичний вісник. – 2009. – Т. 12, № 3. – С. 33–40.
59. Коржик А. В. Фазо-частотные характеристики некоторых форм колебаний пьезокерамических цилиндрических приемников звука при различных видах электродирования в условиях связанности // Акустичний вісник. – 2009. – Т. 12, № 4. – С. 29–33.
60. Коржик А. В. Особенности импедансных характеристик цилиндрического излучателя нулевого порядка, размещенного в замкнутом кольцевом слое // Электроника и связь. – 2013. – № 3. – С. 49–55.
61. Коржик О. В. Випромінення звуку циліндричним електропружним джерелом нульового порядку, яке розміщено в замкненому пружному шарі // Електроніка та зв'язок. – 2012. – № 5. – С. 30–35.
62. Лейко А. Г., Святненко А. О. Про фізичні поля плоских гідроакустичних антен, утворених з циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з жорсткими екранами у внутрішній порожнині // Электроника и связь. – 2016. – № 6. – С. 44–50.
63. Лейко А. Г., Кандрачук І. В., Святненко А. О. Особенности электромеханоакустического преобразования энергии цилиндрическими пьезокерамическими излучателями с внутренними экранами в составе плоских систем // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 85–95.
64. Лейко А. Г., Гусак З. Т., Кандрачук І. В., Мельниченко М. А. Акустические свойства цилиндрической пьезокерамической

- гидроакустической антенны с плоским экраном в диаметральной плоскости // Электроника и связь. – 2015. – Т. 20, № 2. – С. 71–78.
65. Лейко А. Г., Гусак З. Т. Механические поля цилиндрической гидроакустической антенны с плоским экраном в диаметральной плоскости // Электроника и связь. – 2015. – Т. 20, № 3. – С. 87–93.
66. Derepa A. V., Leiko O. G., Drozdenko O. I., Sviatnenko A. O. Influence of construction elements of hydroacoustic transducers with internal baffles on acoustic power of hydroacoustic stations // Weapons and Military Equipment. – 2020. – № 2 (26). – P. 112–118. DOI: 10.34169/2414-0651.2020.2(26).112-118.
67. Дерепя А. В., Канищев В. В., Лейко О. Г., Шишкова К. А., Дрозденко О. І. Про вплив фізичних характеристик заповнюючих рідин на електричні властивості гідроакустичних випромінювачів з внутрішніми екранами // Озброєння та військова техніка. – 2020. – № 3 (27). – С. 77–84. DOI: 10.34169/2414-0651.2020.3(27).77-84.
68. Дерепя А. В., Лейко О. Г., Богданов О. В., Дрозденко О. І., Нижник О. І. Випромінювання звуку циліндричним гідроакустичним перетворювачем в присутності екрану з електрично керованими акустичними властивостями // Озброєння та військова техніка. – 2020. – Т. 28, № 4. – С. 83–88.
69. Позднякова О. М., Дерепя А. В., Ластівка І. О., Лейко А. О., Дрозденко О. І., Осадча А. К. Випромінювання звуку циліндричним п'єзокерамічним гідроакустичним перетворювачем з динамічно керованими параметрами // Озброєння та військова техніка. – 2021. – Т. 29, № 1. – С. 64–70.
70. Aronov B., Bachand C., David A. B. Analysis of the piezoelectric properties of tangentially polarized, stripe-electroded cylinders // J. Acoust. Soc. Amer. – 2011. – Vol. 129, No. 1. – P. 2960–2967.

71. Aronov B., David A. B., Xiang Y. Analysis of unidirectional broadband piezoelectric spherical shell transducers for underwater acoustics // J. Acoust. Soc. Amer. – 2012. – Vol. 131, No. 3. – P. 2079–2090.
72. Shul'ga N. A., Grigor'eva L. O. Comparative Analysis of the Electroelastic Thickness Vibrations of Layers with Curved Boundaries // Int. Appl. Mech. – 2011. – Vol. 47, No. 2. – P. 177–185.
73. Sairajan S., Corey L. B., Aronov B., David A. B. Analysis of electromechanical parameters of thick rings under radial, axial, and circumferential modes of polarization // J. Acoust. Soc. Am. – 2012. – Vol. 132. – P. 2067–2076.
74. Вовк І. В., Грінченко В. Т. О взаимодействии электроакустических преобразователей в антенной решетке // Акустический журнал. – 1996. – Т. 42, № 4. – С. 183–190.
75. Вовк І. В., Коцюба В. С. Об одном методе управления параметрами цилиндрического пьезокерамического излучателя // Акустичний вісник. – 2010. – Т. 13, № 3. – С. 9–14.
76. Коржик А. В. Исследование закономерностей акустического взаимодействия элементов антенных решеток, образованных электроупругими цилиндрическими преобразователями // Системы обработки информации. – 2010. – № 5. – С. 59–66.
77. Коржик А. В., Куроедова Т. С., Филипова Н. Ю. Исследование электромеханических характеристик излучающего цилиндрического пьезокерамического преобразователя с полностью электродированной поверхностью, расположенного в замкнутом кольцевом слое // Электроника и связь. – 2013. – № 1. – С. 102–109..
78. Лейко О. Г., Дрозденко О. І. Перетворювачі для рідинних акустичних технологій і конструкторські шляхи нейтралізації гідростатичного тиску, що діє на них // Системи обробки інформації: збірник наукових

- праць. – Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2015. – Вип. 1 (126). – С. 37–40.
79. Leiko O., Drozdenko O., Derepa A., Sviatnenko A. Acoustic Remote Sensing Piezoceramic Transducers with Internal Screen // 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2020. – P. 710–713. DOI: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088849.
80. Li Q. Digital Sonar Design in Underwater Acoustics: Principles and Applications. – Zhejiang University Press, Hangzhou and Springer-Verlag Berlin, 2012. – 641 p. ISBN: 3642182895.
81. Свєрдлин Г. М. Гидроакустические преобразователи и антенны. – Л.: Судостроение, 1988. – 200 с.
82. Справочник по гидроакустике / Евтютов А. П., Колесников А. Е., Корепин Е. А. и др. – Л.: Судостроение, 1988. – 552 с.
83. Орлов Л. В., Шабров А. А. Гидроакустическая аппаратура рыбопромыслового флота (расчет и проектирование). – Л.: Судостроение, 1987. – 222 с.
84. Kartashev I., Vontz T., Florian H. Regimes of piezoelectric transformer operation // Meas. Sci. Technol. – 2006. – Vol. 17, No. 8. – P. 2150–2158. DOI: 10.1088/0957-0233/17/8/014.
85. Sherrit S. et al. Characterization of transducers and resonators under high drive levels // Proc. IEEE Ultrason. Symp. – 2001. – Vol. 2. – P. 1097–1100. DOI: 10.1109/ultsym.2001.991910.
86. González A., García Á., Benavente-Peces C., Pardo L. Revisiting the Characterization of the Losses in Piezoelectric Materials from Impedance Spectroscopy at Resonance // Materials (Basel). – 2016. – Vol. 9, No. 2. – P. 72. DOI: 10.3390/ma9020072.

- 87.Uchino K. Multilayer Technologies for Piezoceramic Materials // In: Advanced Piezoelectric Materials. – Elsevier, 2017. – P. 423–451. DOI: 10.1016/B978-0-08-102135-4.00011-4.
- 88.Moharana S., Bhalla S. Influence of adhesive bond layer on power and energy transduction efficiency of piezo-impedance transducer // J. Intell. Mater. Syst. Struct. – 2015. – Vol. 26, No. 3. – P. 247–259. DOI: 10.1177/1045389X14523858.
- 89.Wu Z., Cochran S. Loss effects on adhesively-bonded multilayer ultrasonic transducers by self-heating // Ultrasonics. – 2010. – Vol. 50, No. 4–5. – P. 508–511. PMID: 19942247.
- 90.Lierke E. G., Littmann W., Morita T., Hemsell T. Various aspects of the placement of a piezoelectric material in composite actuators, motors, and transducers // J. Korean Phys. Soc. – 2010. – Vol. 57, No. 41. – P. 933–937. DOI: 10.3938/jkps.57.933.
- 91.Andrés R. R., Acosta V. M., Lucas M., Riera E. Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator // Ultrasonics. – 2018. – Vol. 82. – P. 345–356. PMID: 28985624.
- 92.Ruffa A. A. Cooling Acoustic Transducer With Heat Pipes Statement: U. S. Patent 8188638, May 29, 2012.
- 93.Loyau V., Feuillard G., Tran-Huu-Hue L. P. Modeling of the temperature increase in ultrasonic transducers // Proc. IEEE Ultrason. Symp. – 2004. – Vol. 1. – P. 642–645. DOI: 10.1109/ULTSYM.2004.1417806.
- 94.Uchino K. Manufacturing Methods for Piezoelectric Ceramic Materials // In: Advanced Piezoelectric Materials. – Elsevier, 2017. – P. 385–421. DOI: 10.1016/B978-0-08-102135-4.00010-2.

95. Li T., Chen Y. H., Ma J. Frequency dependence of piezoelectric vibration velocity // *Sensors and Actuators, A: Physical*. – 2007. – Vol. 138, No. 2. – P. 404–410. DOI: 10.1016/j.sna.2007.05.024.
96. Baptista F., Budoya D., Almeida V., Ulson J. An Experimental Study on the Effect of Temperature on Piezoelectric Sensors for Impedance-Based Structural Health Monitoring // *Sensors*. – 2014. – Vol. 14, No. 1. – P. 1208–1227. DOI: 10.3390/s140101208.
97. Lin S., Xu J. Effect of the Matching Circuit on the Electromechanical Characteristics of Sandwiched Piezoelectric Transducers // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17, No. 2. – P. 329. PMID: 28208583.
98. Kim S. B., Park J. H., Ahn H., Liu D., Kim D. J. Temperature effects on output power of piezoelectric vibration energy harvesters // *Microelectronics J.* – 2011. – Vol. 42, No. 8. – P. 988–991. DOI: 10.1016/j.mejo.2011.05.005.
99. Ilg J., Rupitsch S. J., Lerch R. Impedance-Based Temperature Sensing With Piezoceramic Devices // *IEEE Sens. J.* – 2013. – Vol. 13, No. 6. – P. 2442–2449. DOI: 10.1109/JSEN.2013.2256121.
100. Mathieson A. C. Nonlinear Characterisation Of Power Ultrasonic Devices Used In Bone Surgery: PhD thesis. – University of Glasgow, 2012. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://theses.gla.ac.uk/3135/>.
101. Khmelev V. N., Barsukov R. V., Genne D. V., Ilchenko E. V. Piezoelectric transducers temperature monitoring system in ultrasonic technological devices // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2012. – Vol. 6, № 3(60). – P. 4–7.
102. Uchino K. Loss Mechanisms in Piezoelectrics: How to Measure Different Losses Separately // *High-Power Piezoelectrics and Loss Mechanisms*. – CRC Press, 2001. – P. 237–320. DOI:10.1201/9781003087519-9.

103. An American National Standard: IEEE Standard on Piezoelectricity // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. – 1984. – Vol. 31, № 2. – P. 8–10. DOI: 10.1109/T-SU.1984.31464.
104. Liao X., et al. Functional Piezocrystal Characterisation under Varying Conditions // Materials (Basel). – 2015. – Vol. 8, № 12. – P. 8304–8326. DOI: 10.3390/ma8125456.
105. Sabat R. G., Mukherjee B. K., Ren W., Yang G. Temperature dependence of the complete material coefficients matrix of soft and hard doped piezoelectric lead zirconate titanate ceramics // Journal Of Applied Physics. – 2007. – Vol. 101, № 6. DOI: 10.1063/1.2560441.
106. Mukherjee B. K., Ren W., Liu S.-F., Masys A. J., Yang G. Non-Linear Constitutive Properties of Piezoelectric Ceramics // MRS Proceedings. – 2001. – Vol. 276. – P. 41–54. DOI: 10.1557/PROC-276-39.
107. C. Miclea et al. Effect of Temperature on The Main Piezoelectric Parameters of A Soft PZT Ceramic // Romanian Journal of Information Science and Technology, vol. 10, no. 3, pp. 243–250, 2007.
108. Lee H., Zhang S., Bar-Cohen Y., Sherit S. High Temperature, High Power Piezoelectric Composite Transducers // Sensors. – 2014. – Vol. 14, № 8. – P. 14526–14552. PMID: 25111242.
109. Sherit S., Mukherjee B. K. Characterization of Piezoelectric Materials for Transducers // Dielectric and Ferroelectric Reviews. – 2007. – 16 Nov. URL: <http://arxiv.org/abs/0711.2657>.
110. Hampton C. P. Failure Analysis Of A 30khz Ultrasonic Welding Transducer: M. S. thesis. – University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.
111. Prokic M. Piezoelectric transducers modeling and characterization. – Switzerland: MPI, 2004.
112. Писаренко Г. Г. Прочность пьезокерамики. – К.: Наукова думка, 1987. – 280 с.

113. Stansfield D. Underwater Electroacoustic Transducers. – Bath University Press, 1990. – Chp. 2.
114. Coates R. F. W. Underwater Acoustic Systems. – Macmillan, 1990. – 199 p.
115. Hodges R. P. Underwater Acoustics: Analysis, Design and Performance of Sonar. – Chichester: Wiley, 2010. – 353 p. ISBN: 0470688750.
116. Кобяков Ю. С., Кудрявцев Н. Н., Тимошенко В. И. Конструирование гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры. – Л.: Судостроение, 1986. – 272 с.
117. Дерепя А. В., Лейко О. Г., Дрозденко О. І., Святненко А. О. Властивості електричних полів гідроакустичних випромінювачів з внутрішніми екранами // Озброєння та військова техніка. – 2019. – № 4(24). – С. 41–49. DOI: 1034169/2414-0651.2019.4(24).41-48.
118. Пат. 121721 С2 Україна, МПК G01S 7/52. Глибоководний звуковідбиваючий екран / А. В. Дерепя, О. Г. Лейко, І. В. Аверічев, О. О. Кочарян, О. М. Позднякова, В. С. Коцюба, К. А. Олійник, В. В. Джаназян, О. І. Дрозденко. – № а201900433; заявл. 16.01.2019; опубл. 10.07.2020, Бюл. № 13/2020.
119. Дрозденко О. І. Розрахункове забезпечення електричної міцності конструкцій електроакустичних перетворювачів, герметизованих полімерними матеріалами // Електроніка і зв'язок. – 2011. – № 1(60). – С. 149–152.
120. Бабаев А. Э., Бут Л. М., Савин В. Г. Нестационарные колебания тонкостенного цилиндрического пьезовибратора в жидкости при неосесимметричном электрическом возбуждении // Прикладная механика. – 1990. – Т. 26. – С. 59–67.

121. Практикум з технічної акустики: навч. посіб. / В. С. Дідковський, О. Г. Лейко, В. Г. Савін та ін. / за ред. В. С. Дідковського. – Київ, 2003. – 191 с.
122. Nishamol P. A., Mathew J., Ebenezer D. D. Acoustic radiation from cylindrical transducer arrays // *Journal of Sound and Vibration*. – 2009. – Vol. 323. – P. 989–1002.
123. Mathew J., Ebenezer D. D. High frequency rays in an infinite fluid cylinder excited by a plane acoustic wave // *Journal of Acoustical Society of India*. – 2009. – Vol. 36. – P. 163–166.
124. Гончар А. І., Терлецький М. П., Шличек Л. І. Оцінка працездатності гідроакустичних антен при зміні температури і впливі підвищеного гідростатичного тиску // *Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)*. – 2007. – № 4. – С. 54–59.
125. Dubus B., Haw G., Granger C., Ledez O. Characterization of multilayered piezoelectric ceramics for high power transducers // *Ultrasonics*. – 2002. – Vol. 40. – P. 903–906.
126. Li H., Deng Z. D., Carlson T. J. Piezoelectric materials used in underwater acoustic transducers // *Sens. Lett.* – 2012. – Vol. 10, No. 3. – P. 679–697. DOI: 10.1166/sl.2012.2597.
127. Karafi M. R., Khorasani F. Evaluation of mechanical and electric power losses in a typical piezoelectric ultrasonic transducer // *Sensors Actuators, A Phys.* – 2019. – Vol. 288. – P. 156–164. DOI: 10.1016/j.sna.2018.12.044.
128. Rathod V. T. A review of electric impedance matching techniques for piezoelectric sensors, actuators and transducers // *Electronics*. – 2019. – Vol. 8, No. 2. – P. 169. DOI: 10.3390/electronics8020169.
129. Нижник А. І., Лейко А. Г. Частотні характеристики електричних полів циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів у складі плоских

- систем // Журнал нано- та електронної фізики. – 2016. – Т. 8, № 4. – С. 4012–4018.
130. Alguero M., Alemany C., Pardo L. Method for obtaining the full set of linear electric, mechanical and electromechanical coefficients and all related losses of a piezoelectric ceramic // Journal of American Ceramics Society. – 2004. – Vol. 87. – P. 209–215.
131. Li S. Progress in and prospects for electrical insulating materials // High Voltage. – 2016. – Vol. 1, No. 2. – P. 90–100.
132. Tan D. The search for enhanced dielectric strength of polymer-based dielectrics: a focused review on polymer nanocomposites // Journal of Applied Polymer Science. – 2020. – Vol. 137, No. 33. DOI: 10.1002/app.49379.
133. Доценко Н. С., Соболев В. В. Долговечность элементов радиоэлектронной аппаратуры (влияние влаги). – Л.: Энергия, 1973. – 160 с.
134. Лейко О. Г., Дрозденко О. І. Рідинні акустичні технології і аналіз електричної міцності конструкцій електроакустичних приладів для них // Системи обробки інформації. – 2012. – Вип. 6 (104). – С. 16–20.
135. Tan A. C., Hover F. S. On the influence of transducer heating in underwater ultrasonic thrusters // 20th International Congress on Acoustics. – Sydney, Australia, 2010. – P. 1–7.
136. Sherit S., Bao X., Sigel D. A., Gradziel M. J., Askins S. A., Dolgin B. P., Bar-Cohen Y. Characterization of transducers and resonators under high drive levels // IEEE International Ultrasonics Symposium. – Atlanta, GA, 2001.
137. Su Y., Liu Y., Vasic D., Costa F., Wu W., Lee K. Power enhancement of piezoelectric transformer by adding thermal dissipation layers // ICAST2013: 24th International Conference on Adaptive Structures and Technologies. – 2013. – P. 239–250.

138. Дрозденко О. І. Метод розрахунку температур розігріву конструкцій циліндричних електроакустичних перетворювачів компенсованого типу, герметизованих метало-полімерними шарами // *Electronics and Communications*. – 2014. – Vol. 19, No. 3(80). – P. 88–93. DOI: 10.20535/2312-1807.2014.19.3.141478.
139. Дрозденко О. І. Теплові поля силових конструкцій циліндричних п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів // *Electronics and Communications*. – 2015. – Vol. 20, No. 1(83). – P. 65–72. DOI: 10.20535/2312-1807.2015.20.1.47709.
140. Дрозденко О. І., Дрозденко К. С., Лейко О. Г., Перчевська Л. В. Забезпечення теплового режиму роботи стержневих конструкцій п'єзокерамічних електроакустичних перетворювачів // *Мікросистеми, електроніка та акустика*. – 2019. – № 24(5). – С. 56–63. DOI: 10.20535/2523-4455.2019.24.5.190452.
141. Perchevska L., Drozdenko O., Drozdenko K., Leiko O. Study of the influence of the housing on the cooling efficiency of the piezoceramic electroacoustic Langevin-type transducer // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2021. – Vol. 3 (1 (59)). – P. 50–55. DOI: 10.15587/2706-5448.2021.231279.
142. Perchevska L., Drozdenko O., Drozdenko K. Shifting the operating frequency of the piezoceramic electroacoustic transducer Langevin type using passive cooling methods // *ScienceRise*. – 2021. – No. 4. – P. 3–10. DOI: 10.21303/2313-8416.2021.002019.
143. Drozdenko O., Drozdenko K., Perchevska L. Features of thermal fields calculation for cylindrical piezoceramic transducers with compensated design // 2018 IEEE Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering Congress (UKRSYW), Conference Proceedings. – P. 44–47. – Kyiv, Ukraine, 2–6 October, 2018.

144. Drozdenko O., Drozdenko K., Perchevska L. Methods for analyzing the thermal field of rod type piezoceramic electroacoustic transducers // 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Conference Proceedings. – P. 750–753. – Kyiv, Ukraine, 16–18 April, 2019.
145. Drozdenko O., Drozdenko K., Leiko O., Perchevska L. The Thermal Fields Analysis of Sealed Cylindrical Piezoceramic Electroacoustic Transducers Compensated Construction // 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2020. – P. 815–819. DOI: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088757.
146. J van Randerat., Setterington R. E. Piezoelectric Ceramics - Properties and Applications. – 1971. Retrieved from: <http://www.introni.it/pdf/Piezoelectric%20ceramics.pdf>.
147. Mathieson A., Cardoni A., Cerisola N., Lucas M. The influence of piezoceramic stack location on nonlinear behavior of Langevin transducers // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. – 2013. – Vol. 60, No. 6. – P. 1126–1133. DOI: 10.1109/TUFFC.2013.2675.
148. Karafi M., Kamali S. A continuum electro-mechanical model of ultrasonic Langevin transducers to study its frequency response // Appl. Math. Model. – 2021. – Vol. 92. – P. 44–62. DOI: 10.1016/j.apm.2020.11.006.
149. Harkness P., Cardoni A., Russell J., Lucas M. Designing a Hollow Langevin Transducer for Ultrasonic Coring // Appl. Mech. Mater. – 2010. – Vol. 24–25. – P. 65–70. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.24-25.65.
150. Vasiljev P., Mazeika D., Borodinas S. Minimizing heat generation in a piezoelectric Langevin transducer // IEEE Int. Ultrason. Symp. IUS. – 2012. – P. 2714–2717. DOI: 10.1109/ULTSYM.2012.0680.

151. Lu X., Hu J., Peng H., Wang Y. A new topological structure for the Langevin-type ultrasonic transducer // *Ultrasonics*. – 2017. – Vol. 75. – P. 1–8. DOI: 10.1016/j.ultras.2016.11.008.
152. Huang F., Zheng D.-Y., Hu S.-M., Peng G.-G. The Influence of Environment Temperature on the Degradation of Lead Zirconate Titanate Ceramic // *International Conference on Material Science and Applications (Icmsa 2015)*, 2015. – Vol. 3. – P. 723–727. DOI: 10.2991/icmsa-15.2015.132.
153. Гільчук А. В., Халатов А. А., Доник Т. В. Теорія теплопровідності: підручник для студентів спец. 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 131 с.
154. Kalisz O. et al. Thermographic evaluation of healing process on patients after surgery of cataract with the use of facoemulsification // *Proceedings of the 2008 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, 2008. DOI: 10.21611/qirt.2008.03_04_17.
155. Baptista F., Budoya D., Almeida V., Ulson J. An Experimental Study on the Effect of Temperature on Piezoelectric Sensors for Impedance-Based Structural Health Monitoring // *Sensors*. – 2014. – Vol. 14, No. 1. – P. 1208–1227. DOI: 10.3390/s140101208.
156. Ilg J., Rupitsch S. J., Lerch R. Impedance-Based Temperature Sensing With Piezoceramic Devices // *IEEE Sens. J.* – 2013. – Vol. 13, No. 6. – P. 2442–2449. DOI: 10.1109/JSEN.2013.2256121.
157. Kurowskia P. *Thermal Analysis with SolidWorks Simulation 2013*. – 2013. ISBN: 978-1-58503-785-8.
158. Kurowskia P. *Vibration Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2015*. – SDC Publications, 2015. ISBN-13: 978-1-58503-938-8.

159. Auld B. A. Acoustic Fields and Waves in Solids. – 2nd ed. – Wiley, New York, 1973. – Vol. 1, Chap. 8. – P. 311.
160. Bogush M. V., Bogush E. M., Pikalev E. M. Analysis of temperature stresses in the elements of hydroacoustic antennas // Instrumentation. – 2013. – Vol. 10, No. 160. – P. 38–42. ISSN: 2071-7865.
161. Protasov A. Reconstruction of the Thermal Field Image from Measurements in Separate Points // Conf. proceed. Of IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, Aug 29–31, Kyiv, Ukraine, 2017. – P. 89–92.
162. Lozano A., Amaveda H., Barreras F., Jorda` X., Lozano M. High-Frequency Ultrasonic Atomization With Pulsed Excitation // J. Fluids Eng. – 2003. – Vol. 125, No. 6. – P. 941–945. DOI: 10.1115/1.1603301.
163. Tomalczyk K., Napiorkowski K., Wiecek B. Performance Measurement piezoelektrycznego transformatory // Artykuły RTV Instytut Elektroniki. – 2005. – № 05/10. – P. 43–48.
164. Tomalczyk K., Wiecek B. Thermal analysis and thermographic measurements of piezoelectric transformers [Електронний ресурс] // QIRT 2006: 8th Conference on Quantitative InfraRed Thermography, 28-30 June 2006, Padova, Italy. – P. 84. Режим доступу до ресурсу: <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/093.pdf>.
165. Bove T., Wolny W., Ringgaard E., Breboel K. New Type of Piezoelectric Transformer With Very High Power Density // Ferroperm Piezoceramics A/S 12th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics Honolulu, Hawaii, July 21 - August 2, 2000. – P. 321–324.
166. Umeda M., Takahashi S., Sasaki Y., Nakamura K., Ueha S. Vibration stress and temperature dependence of piezoelectric resonators with lead-zirconate-titanate ceramics // Electron. Commun. Japan (Part II Electron.). –

2000. – Vol. 83, No. 9. – P. 1–7. DOI: 10.1002/1520-6432(200009)83:9<1::AID-ECJB1>3.0.CO;2-W.
167. Дерепа А.В., Лейко О.Г., Кочарян О.О., Майборода О.О., Блінцов О.В., Дрозденко О.І., Богданова Н.В., Ісаєнко О.С. Гідроакустичний випромінюючий тракт / пат. України на винахід № UA 124067 C2, МПК G 01 S 7/52. – заявл. 16.01.2019, опубл. 14.07.2021, Бюл. № 28..
168. Lee H., Zhang S., Bar-Cohen Y., Sherrit S. High Temperature, High Power Piezoelectric Composite Transducers // Sensors. – 2014. – Vol. 14, No. 8. – P. 14526–14552. PMID: 25111242.
169. Butler J. L., Butler A. L., Butler S. C. Thermal model for piezoelectric transducers (L) // J. Acoust. Soc. Am. – 2012. – Vol. 132, No. 4. – P. 2161–2164. PMID: 23039410.
170. Takahashi S., Yamamoto M., Sasaki Y. Nonlinear piezoelectric effect in ferroelectric ceramics // Japanese J. Appl. Physics, Part 1 Regul. Pap. Short Notes Rev. Pap. – 1998. – Vol. 37, No. 9 PART B. – P. 5292–5296. DOI: 10.1143/jjap.37.5292.
171. Umeda M., Nakamura K., Ueha S. The measurement of high-power characteristics for a piezoelectric transducer based on the electrical transient response // Japanese J. Appl. Physics, Part 1 Regul. Pap. Short Notes Rev. Pap. – 1998. – Vol. 37, No. 9 PART B. – P. 5322–5325. DOI: 10.1143/jjap.37.5322.
172. González A., García Á., Benavente-Peces C., Pardo L. Revisiting the Characterization of the Losses in Piezoelectric Materials from Impedance Spectroscopy at Resonance // Materials (Basel). – 2016. – Vol. 9, No. 2. – P. 72. DOI: 10.3390/ma9020072.
173. Дрозденко О.І., Попова А.М. Методи усунення температурних напруг у конструкціях електроакустичних перетворювачів // Zbiór raportów naukowych. "Inżynieria i technologia. Teoria. Praktyka".

- Міжнародна науково-практична конференція, 29–30 листопада 2014 року, Щецин. – Варшава:.. – 2014. – С. 61–62.
174. Moharana S., Bhalla S. Influence of adhesive bond layer on power and energy transduction efficiency of piezo-impedance transducer // J. Intell. Mater. Syst. Struct. – 2015. – Vol. 26, No. 3. – P. 247–259. DOI: 10.1177/1045389X14523858.
175. Wu Z., Cochran S. Loss effects on adhesively-bonded multilayer ultrasonic transducers by self-heating // Ultrasonics. – 2010. – Vol. 50, No. 4–5. – P. 508–511. PMID: 19942247.
176. Lierke E. G., Littmann W., Morita T., Hemsel T. Various aspects of the placement of a piezoelectric material in composite actuators, motors, and transducers // J. Korean Phys. Soc. – 2010. – Vol. 57, No. 41. – P. 933–937. DOI: 10.3938/jkps.57.933.
177. Дрозденко А.И., Перчевская Л.В. Определение теплового поля пьезокерамических электроакустических преобразователей стержневого типа // Пятая Международная научно-техническая конференция «Информационные проблемы теории акустических, радиоэлектронных и телекоммуникационных систем IPST-2016». Харьков 2016.
178. Ruffa A. A. Cooling Acoustic Transducer With Heat Pipes Statement. – U. S. Patent 8188638, May 29, 2012.
179. Hampton C. P. Failure Analysis Of A 30khz Ultrasonic Welding Transducer. – M. S. thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.
180. Uchino K. High-Power Piezoelectrics and Loss Mechanisms. – 2nd ed. – Elsevier Ltd., 2017. – <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102135-4.00017-5>.
181. Su Y. H., Liu Y. P., Vasic D., Costa F., Wu W. J., Lee C. K. Power enhancement of piezoelectric transformer by adding thermal dissipation

- layers // ICAST 2013: 24th Int. Conf. Adapt. Struct. Technol., 7–9 October.
– P. 239–250.
182. Kosuba S. I., Skicuk S. V. The effectiveness of pre-cooling the irrigation solution for cataract phacoemulsification // *Ophthalmol. J.* – 2008. – Vol. 5.
– P. 27–28.
183. Sienkiewicz L. K. Concept, implementation and analysis of the piezoelectric resonant sensor/actuator for measuring the aging process of human skin // INP Toulouse, 2016. – https://oatao.univ-toulouse.fr/16248/1/Sienkiewicz_Lukasz.pdf.
184. Al-Jumaily A. M., Meshkinzar A. On the Development of Focused Ultrasound Liquid Atomizers // *Adv. Acoust. Vib.* – 2017. – P. 1–10. DOI: 10.1155/2017/7861726.
185. Дрозденко О.І., Кулик Т.А. Вибір матеріалів для конструкції ультразвукового накінечника факоемульсифікатора // Міжнародна наукова інтернет-конференція "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення" – Тернопіль, 2017.
186. Kalisz A. R.-M. O., Gerkowicz M., Wolski T., Gozdzik K., Baranowski P., Mazurek W. Thermographic evaluation of healing process on patients after surgery of cataract with the use of facoemulsification // 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Krakow, 2008. – DOI: 10.21611/qirt.2008.03_04_17.
187. Thomas D., Ebenezer Sivakumar D. D., Srinivasan M. Power dissipation and temperature distribution in piezoelectric ceramic slabs // *The Journal of the Acoustical Society of America* – 2010. – Vol. 128, P. 1700. – <https://doi.org/10.1121/1.3478777>.
188. Scarpa T. J. Electroacoustic sandwich transducers. – US patent 3,140,859, July 14, 1964.

189. Robert A. J., Sheehan J. F. Electroacoustic Converter. – US patent 6,434,244 B1, Aug. 13, 2002.
190. Vjuginova A. A. Multifrequency Langevin-Type Ultrasonic Transducer // J. Nondestruct. Test. – 2019. – Vol. 55, No. 4. – P. 249–254. DOI: 10.1134/S1061830919040132.
191. Andrés R. R., Acosta V. M., Lucas M., Riera E. Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator // Ultrasonics. – 2018. – Vol. 82. – P. 345–356.
192. DeAngelis D. A., Schulze G. W., Wong K. S. Optimizing Piezoelectric Stack Preload Bolts in Ultrasonic Transducers // Phys. Procedia – 2015. – Vol. 63. – P. 11–20. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.03.003.
193. Nilsson B., Dahlberg H. High Power Ultrasonic Transducer. – US 6,137,209, Oct. 24, 2000.
194. Pak A., Abdullah A. An Approach to Designing a Dual Frequency Piezoelectric Ultrasonic // Journal of Stress Analysis – 2017. – Vol. 1, No. 2. – P. 43–53.
195. Arata D. Why Ultrasonic Cleaning Systems Fail—And How to Prevent It. – 2006. – [Online]. Available: <https://www.ptonline.com/articles/why-ultrasonic-cleaning-systems-fail-and-how-to-prevent-it>.
196. Peshkovsky A. S., Peshkovsky S. L. Efficient cooling of piezoelectric transducers. – US patent 9,142,751 B2, Sep. 22, 2015.
197. Hielscher H. Method And Device For Cooling Ultrasonic Transducers. – US patent 8,004,158 B2, Aug. 23, 2011.
198. Budd J. C., Gekelman D., White J. M. Temperature rise of the post and on the root surface during ultrasonic post removal // Int. Endod. Journal. – 2005. – Vol. 38, No. 10. – P. 705–711. DOI: 10.1111/j.1365-2591.2005.01002.x.

Додаток Д1
Впровадження результатів дисертації в проектні роботи ДП «Київський науково-дослідний інститут гідроапаратури»

Державний концерн
УКРОБОРОНПРОМ
Державне підприємство
«Київський науково-дослідний
Інститут
ГІДРОАПАРАТУРИ»



The State Concern
UKROBORONPROM
State Enterprise
«Kyiv Scientific Research
Institute
Of HYDRODEVICES»

Україна, 03035, Київ, вул. Сурікова, 3
Тел. (380-44) 239-90-18,
факс (380-44) 239-90-17
e-mail: office@hydrodevices.kiev.ua
ryba@ukrpack.net
WWW.HYDRODEVICES.KIEV.UA

3, Surikova str., Kyiv, 03035, Ukraine
Tel.: (380-44) 239-90-18,
fax: (380-44) 239-90-17
e-mail: office@hydrodevices.kiev.ua
ryba@ukrpack.net
WWW.HYDRODEVICES.KIEV.UA

19.08.2024 № 14/08
на № _____ від _____

Затверджую

В. о. директора Державного підприємства
«Київський науково-дослідний інститут
гідроапаратури», к.т.н.



К.В. Ковальчук

«19» 08 2024 р.

Акт впровадження
результатів дисертаційної роботи **Дрозденка Олександра Івановича**
«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКІВ ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ ЗАСАДИ
КОНСТРУЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ АПАРАТІВ АКУСТИКИ
ПРУЖНИХ СЕРЕДОВИЩ»

Теоретичні положення та розрахункове забезпечення робіт з конструювання електроакустичних апаратів акустики, наведені в матеріалах докторської дисертації Дрозденка О.І. використані для розробки випромінюючих та приймаючих електроакустичних перетворювачів та антен при виконанні договору №155/16 від 22.11.2016 р., (додаткова угода №4 від 11.06.2019р.) "Широкопasmові випромінюючі та приймаючі електроакустичні тракти акустичних апаратів".

При розробці конструкцій широкопasmових електроакустичних апаратів використані розрахунки величин механічної міцності, та проведений аналіз їх теплових полів, що дозволило обґрунтовано вибрати найбільш раціональний варіант розроблюваних конструкцій цих апаратів.

Начальник науково-дослідного відділу
ДП «КНДІП»

В.С. Коцюба

Додаток Д2

Впровадження результатів дисертації в навчальний процес КПІ імені Ігоря Сікорського

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
доцента кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем Національного
технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського» Дрозденка Олександра Івановича у навчальному процесі

Ми, що нижче підписалися, заступник декана факультету електроніки КПІ імені
Ігоря Сікорського к.т.н., доц. Попович П.В., завідувач кафедри акустичних та
мультимедійних електронних систем д.т.н., проф. Найда С.А. склали цей Акт про те,
що результати дисертаційної роботи Дрозденка О.І. «Теоретичні основи розрахунків
та фізико-технічні засади конструювання електромеханічних приладів акустики
пружних середовищ» впроваджені у навчальний процес кафедри акустичних та
мультимедійних електронних систем (АМЕС), а саме:

- 1) в дисциплінах «Електроакустичні перетворювачі» та «Акустичні
антени», відображені методи і методики щодо кількісного визначення
величин механічної та електричної міцностей акустичних антен та
електроакустичних перетворювачів;
- 2) в дисципліні «Конструювання акустичних приладів та систем»
використовуються методики знаходження механічних і електричних
навантажень, а також теплових полів для циліндричних і стержневих
електроакустичних приладів; використовується тривимірна модель
електроакустичного приладу в лабораторних роботах «Частотний
аналіз твердотільної моделі в системі тривимірного моделювання
SOLIDWORKS» та «Термічний аналіз твердотілої моделі в системі
тривимірного моделювання SOLIDWORKS»;
- 3) в дисципліні «Сучасні тенденції в електроакустичних технологіях»
використані методи розрахунків механічних та теплових навантажень в
розділі «Інструментальна УЗ хірургія. Електроакустичні перетворювачі
стрижневого типу».

Заступник декана факультету електроніки,
к.т.н., доц.



Павло ПОПОВИЧ

Завідувач кафедри АМЕС, д.т.н., проф.

Сергій НАЙДА