

На правах рукописи



Агейкин Никита Алексеевич

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛАСТИН НА
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ С
НАГРУЗКОЙ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЫ

Специальность 1.3.8

Физика конденсированного состояния

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук

Научный руководитель:	Кузнецова Ирен Евгеньевна доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник ФГБУН ИРЭ РАН, г. Москва
Официальные оппоненты:	Дамдинов Баир Батуевич доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск Петронюк Юлия Степановна кандидат физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН, г. Москва
Ведущая организация:	ФГБНУ "Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов" Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Троицк

Защита состоится «20» марта 2026 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.1.111.01 при ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая 11, корп. 7, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН и на сайте <http://www.cplire.ru>

Автореферат разослан « » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.111.01,
доктор физ.-мат. наук, доцент



Кузнецова И. Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Одной из важных практических задач современной науки и техники является контроль свойств жидкостей таких как, водные растворы, суспензии, коллоидные растворы и т.д. Изменение электропроводности [1 - 3], плотности, упругости [3], вязкости [4] или агрегатного состояния жидкостей может негативно влиять на эксплуатационные характеристики различных приборов. Идентификация жидкостей по их физическим свойствам является важной составляющей различных технологических процессов. Для этого в различных промышленности используют устройства типа «электронный нос» и «электронный язык» (мультисенсорные системы) на основе кондуктометрических [5], химических [6], и резистивных [7] методов. Перечисленные методы исследования свойств жидкостей обладают одним очень важным недостатком, который заключается в наличии контакта измерительных электродов с исследуемой средой, что приводит к их деградации и разрушению.

Акустические методы исследования позволяют преодолеть эту проблему, так как измерительные электроды, при помощи которых возбуждают соответствующие акустические волны, не контактируют с анализируемыми средами [8]. Взаимодействие объемных (ОАВ) и поверхностных акустических волн (ПАВ), а также акустических волн в пластинах (АВП) с жидкостью происходит из-за их контакта друг с другом и описывается общим упругим полем, которое определяет распределение механических деформаций и напряжений по всей структуре. Следует отметить, что в случае пьезоактивных акустических волн в анализ необходимо добавлять распределение по структуре пьезоэлектрического поля, сопровождающего такую волну. Характеристики жидкости, такие как вязкость, упругость, электропроводность и диэлектрическая проницаемость, оказывают влияние на фазовую скорость и затухание акустических волн. Это позволяет получать калибровочные зависимости указанных свойств жидкости от параметров акустических волн.

В настоящее время известны акустоэлектронные устройства и методы, для исследования отдельных параметров жидкости (вязкость [9], электропроводность [10], диэлектрическая проницаемость [11], температура [12]). Чаще всего подобные устройства являются различными конфигурациями линий задержки, содержащих излучающий и принимающий встречно-штыревые преобразователи (ВШП), которые размещены на поверхности пьезоэлектрика. Известны мультисенсорные акустические устройства, содержащие несколько акустоэлектронных устройств, работающие на ОАВ и ПАВ резонаторах. Подобные устройства используются для оценки качества пищевого этанола [13], идентификации марок авиационных масел [14], идентификации и классификации различных сортов крепких алкогольных напитков [15].

Несмотря на то, что существует большое количество устройств для идентификации жидкостей, работающих как на одном принципе, так и на комбинации различных методов, разработка новых устройств по-прежнему является актуальной задачей. Она может решаться при помощи использования других типов акустических волн, новых материалов и оригинальных конструкций разрабатываемых устройств. К новому типу конструкции можно отнести использование набора линий задержек, размещенных на одном и том же анизотропном кристалле, с различными периодами ВШП, которые возбуждают

большое количество акустических волн с различными фазовыми скоростями и поляризациями в разных кристаллографических направлениях.

Еще одним важным направлением является необходимость разработки различных датчиков для контроля свойств вышеуказанных жидкостей при различных, в том числе и отрицательных температурах.

Таким образом, задача усовершенствования акустических методов анализа жидкостей весьма актуальна и требует дальнейшего развития как теоретической базы, так и экспериментальных подходов.

Целью диссертационной работы является исследование влияния анизотропии пьезоэлектрических пластин на взаимодействие акустических волн различных типов с расположенными на поверхности пластины: водой, водными растворами и суспензиями, а также льдом, возникающим в результате фазового перехода вода-лёд.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследование влияния анизотропии пьезоэлектрических пластин на взаимодействие акустических волн различных типов с жидкостями, расположенными на поверхности пластины.
2. Исследование влияния анизотропии пьезоэлектрических пластин на детектирование фазового перехода вода-лёд, возникающего на поверхности пластины, при помощи акустических волн различных типов.
3. Исследование влияния анизотропии пьезоэлектрических пластин на взаимодействие акустических волн различных типов с биологическими и вязкими суспензиями, расположенными на поверхности пластины.
4. Экспериментальное исследование влияния дистиллированной воды на радиационные потери акустических волн Лэмба высших порядков в анизотропных пьезоэлектрических пластинах.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Ориентационные гистограммы изменения вносимых потерь $\Delta S_{12} = |S_{12}^{(ж-ть)}| - |S_{12}^{(H_2O)}|$ для акустических волн различных типов в сильно анизотропных пьезоэлектрических пластинах, находящихся в контакте со слабовязкими жидкостями (раствор NaCl, раствор $C_6H_{12}O_6$, раствор $C_6H_8O_7$, раствор $C_5H_8NO_4Na$, настой полыни), позволяют качественно и количественно различать эти жидкости. Различная степень влияния исследованных жидкостей на акустические волны, распространяющиеся в различных направлениях анизотропных пластин, обусловлена как электрическими, так и механическими свойствами самих жидкостей и поляризацией соответствующих волн.

2. В структуре «пластина – вода/лед» величина вносимых потерь (ВП) S_{12} для акустических волн различных типов при фазовом переходе вода-лед увеличивается, уменьшается или остается практически постоянной в зависимости от анизотропии материала и типа волны. При этом в частотном диапазоне 10 - 60 МГц при толщине пластин $h = 500$ мкм волны Лэмба с частотами $f = 40.53$ МГц (Y,X+30°LiNbO₃), $f = 18.13$ МГц (Y,X+60°LiNbO₃) и $f = 56.5$ МГц (Y,X+60°LiNbO₃) при фазовом переходе вода-лед характеризуются максимальным увеличением ВП $\Delta S_{12} = |S_{12}^{(лед)}| - |S_{12}^{(H_2O)}| = 2.3$ дБ/мм, максимальным уменьшением ВП $\Delta S_{12} = -0.7$ дБ/мм и отсутствием изменения ВП $\Delta S_{12} = 0.05$ дБ/мм, соответственно. Для случая пластины Y,X+30° LiNbO₃ переход из воды в лед приводит к полному поглощению всех акустических

волн в рассматриваемом диапазоне частот, за исключением одной волны на частоте $f = 36.8$ МГц.

3. При контакте анизотропной пьезоэлектрической пластины с невязкой, непроводящей жидкостью затухание акустических волн Лэмба обусловлено совокупностью радиационных потерь из-за присутствия нормальной к поверхности пластины компоненты механического смещения частиц (U_3) и потерь из-за разности фазовых скоростей волны Лэмба V_ϕ и продольной объемной акустической волны в жидкости $V_{ж}$. При этом доминирующей при формировании радиационных потерь является нормированная величина U_3/U_1 (U_1 – компонента механического смещения, направленная вдоль волнового фронта волны). Для $U_3/U_1 \ll 1$ излучение волн Лэмба в жидкость и величина радиационных потерь малы даже при $V_\phi \gg V_{ж}$, для $U_3/U_1 \geq 1$ излучение в жидкость и величина радиационных потерь велики и могут достигать значений, сравнимых с таковыми для поверхностных акустических волн в том же материале (~ 5 дБ/мм).

Научная новизна работы

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований:

1. Показано, что с помощью метода, основанного на использовании ориентационных гистограмм изменения вносимых потерь (ΔS_{12}) для акустических волн различных типов в пьезоэлектрических пластинах, контактирующих с жидкостью, можно идентифицировать слабвязкие водные растворы, которые отвечают за пять базовых «вкусов» человека. При этом, «вкус» рассматривается как набор физических параметров (плотность ρ , вязкость η , электропроводность σ , диэлектрическая проницаемость ε , модуль упругости C_{11}).

2. Показано, что в структуре «пластина – вода/лед» величина вносимых потерь (ВП) S_{12} для акустических волн различных типов при фазовом переходе вода-лед может увеличиваться, уменьшаться или оставаться практически постоянной в зависимости от анизотропии материала и типа волны.

3. В результате исследования влияния анизотропии на изменение свойств акустических волн различных типов при анализе фазового перехода вода – лед обнаружено, что в пластине $Y, X+30^\circ$ LiNbO₃ переход из воды в лед приводит к полному поглощению всех акустических волн в рассматриваемом диапазоне частот, за исключением одной волны на частоте $f = 36.8$ МГц.

4. На примере суспензий аэробных бактерий *Rhodococcus sp* и *Metylobacterium sp* в питательной среде Лурье-Бертрана показана возможность регистрации различных типов микробиологических сред при помощи многопараметрического многомодового акустоэлектронного устройства, состоящего из нескольких линий задержки, расположенных на одной пьезоэлектрической пластине и поддерживающих распространение акустических волн с различными фазовыми скоростями и частотами в зависимости от анизотропии пластины.

5. На примере суспензии силиконового масла с микрочастицами железа и оксида железа показано, что при помощи разработанного многопараметрического многомодового акустоэлектронного устройства возможна регистрация загрязнения вязкой среды различными микрочастицами.

6. Показано, что при контакте пьезоэлектрической пластины с дистиллированной водой величина радиационных потерь акустических волн различных типов в таких пластинах в большей степени зависит от значения нормальной компоненты механического смещения частиц (U_3), чем от соотношения

фазовых скоростей самой волны к скорости продольной объемной акустической волны в воде.

Научная и практическая ценность работы

Научная значимость работы заключается в результатах исследования влияния анизотропии пьезоэлектрических пластин на взаимодействие акустических волн различных типов с водными растворами, биологическими и вязкими суспензиями, со льдом, возникающим в результате фазового перехода вода–лёд, расположенными на поверхности пластины. Исследование радиационных потерь в различных материалах и в различных направлениях распространения показало, какой из механизмов является доминирующим в формировании радиационных потерь акустических волн различных типов. Этот механизм затухания присутствует всегда, когда акустическая волна контактирует с жидкостью. С помощью акустоэлектронного метода, основанного на использовании набора линий задержек на анизотропной пластине $128^\circ\text{Y LiNbO}_3$, показана возможность идентификации слабовязких водных растворов, соответствующих пяти базовым «вкусам». Также данным методом были идентифицированы аэробные бактерии разных типов в питательной среде Лурье-Бертрена, и вязкие суспензии на основе машинного масла и различных нано- и микрочастиц. Использование анизотропии в одном и том же материале, позволяет получить большой набор данных о скорости и затухании акустических волн различных типов, которые имеют практическую значимость при применении машинного обучения. Научной новизной также обладают результаты теоретического анализа акустических волн различных типов в пьезоэлектрических пластинах, находящихся в контакте с жидкостью, свойства которой изменяются в процессе фазового перехода вода-лед.

Полученные результаты легли в основу разработки акустических методов, позволяющих решать прикладные задачи, связанные с контролем обледенения различных конструкций, улучшением прогнозирования ситуативных изменений агрегатного состояния жидкостей, что критически важно для предотвращения техногенных катастроф в климатически нестабильных регионах. Полученные результаты могут быть использованы для контроля качества водных растворов, биологических суспензий, смазочных материалов, масел и других промышленных и лабораторных жидкостей.

Достоверность представленных в диссертации результатов обусловлена использованием широко известных методов измерения характеристик акустических сигналов, подтверждается их воспроизводимостью, надежностью примененных методов исследования и обработки данных. Полученные результаты не противоречат устоявшимся представлениям, приведенным в научной литературе, а дополняют их. Полученные результаты были признаны научной общественностью при обсуждениях на специализированных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах.

Апробация работы

Результаты работы были представлены на отечественных и международных конференциях, среди которых: 18-й, 19-й, 20-й и 21-й Молодежный конкурс имени Ивана Анисимкина (Москва, Россия - 2022, 2023, 2024, 2025); XXXVI, XXXVII сессии Российского акустического общества (Москва, Россия – 2024, 2025); 32-я, 33-я и 34-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, Россия - 2022, 2023, 2024г);

XVII и XVIII Всероссийская конференция молодых ученых НННФ (Саратов, Россия - 2022, 2023).

Исследования, приведенные в настоящей работе, проводились при поддержке грантов: МОН № 075-15-2023-580, РНФ № 20-19-00708П, ГЗ ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН FFWZ 2025-0001.

Личный вклад автора.

Автором проведено планирование и постановка экспериментов. Обсуждение полученных результатов проводилось совместно с соавторами работ, опубликованных по теме диссертации. Автор принимал участие в теоретических исследованиях и обсуждении полученных результатов.

Публикации. Основные результаты по теме диссертационной работы опубликованы в 6 научных работах, в том числе: в 4 статьях [1*,2*,4*,5*], в журналах, входящих в Международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus, в Белый список, а также в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, в 2 докладах [3*, 6*], опубликованных в трудах Всероссийских конференций.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность результатов, а также определены научные положения, выносимые на защиту, раскрыта структура и объем диссертации.

Первая глава диссертации посвящена исследованию влияния анизотропии пьезоэлектрических пластин на взаимодействие акустических волн различных типов с жидкостями, расположенными на поверхности пластины.

Вначале был проведен теоретический анализ влияния слабвязких 0.9% водных растворов (раствор NaCl, раствор $C_6H_{12}O_6$, раствор $C_6H_8O_7$, раствор $C_5H_8NO_4Na$, настой полыни) на характеристики акустических волн высших порядков в пластине $128Y^\circ LiNbO_3$ для разных направлений распространения. Эти жидкости были выбраны в предположении, что вкус можно рассматривать как набор физических параметров (плотность ρ , вязкость η , электропроводность σ , диэлектрическая проницаемость ϵ , модуль упругости C_{11}). В связи с этим каждой из этих жидкостей было поставлено соответствие таким базовым вкусам, как сладкий, соленый, кислый, горький и умами. Была решена задача распространения акустических волн в структуре «вязкая, проводящая жидкость – пластина $128^\circ Y$, $X+\Theta LiNbO_3$ – вакуум» (рисунок 1).

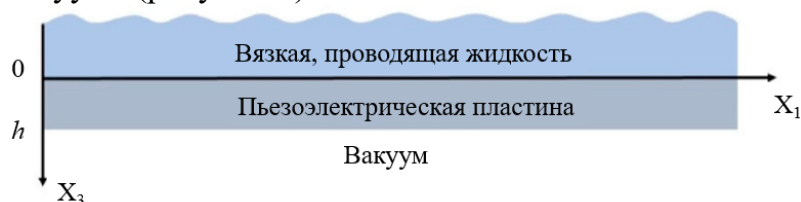


Рисунок 1. Геометрическая модель структуры «пьезоэлектрическая пластина — вязкая, проводящая жидкость».

Для этого были записаны соответствующие уравнения для всех граничащих сред. Решение искалось в виде плоской неоднородной волны. Для каждой из сред была решена задача на поиск собственных значений и собственных векторов. Далее были записаны соответствующие граничные условия:

$$X_3 = 0: U_i^{pz} = U_i^{\text{ж-сть}}; T_{i3}^{pz} = T_{i3}^{\text{ж-сть}}; \Phi^{pz} = \Phi^{\text{ж-сть}}; D_3^{pz} = D_3^{\text{ж-сть}}; J_3^{\text{ж-сть}} = 0, \quad (1)$$

$$X_3 = h: T_{i3}^{pz} = 0; \Phi^{pz} = \Phi^{\text{вак}}; D_3^{pz} = D_3^{\text{вак}}. \quad (2)$$

Поиск фазовой скорости, которая являлась параметром составленной матрицы граничных условий, проводился итерационным методом. Условием нахождения искомой скорости являлось равенство нулю детерминанта матрицы граничных условий.

В результате исследования были определены нормированное на длину волны затухание (Γ , дБ/λ) и компоненты механического смещения (U_1, U_2, U_3) для волн Лэмба с частотами 34, 37, 41, 44, 48 МГц в направлениях распространения $\Theta = X_1 + 0^\circ$; $X_1 + 30^\circ$; $X_1 + 60^\circ$; $X_1 + 90^\circ$. Подобная задача была решена для случая металлизированной в плоскости $x_3 = h$ пьезоэлектрической пластины. Это позволило рассчитать коэффициент электромеханической связи (k^2).

Анализ полученных данных показал, что влияние различных жидкостей на акустические волны Лэмба в анизотропных пьезоэлектрических пластинах обусловлено как электрическими, так и механическими свойствами самих жидкостей, так и поляризацией соответствующих волн. Несмотря на то, что механические свойства использованных жидкостей близки между собой, затухание волн различных типов в их присутствии обусловлено не только различием их электрических параметров, но и различием их поляризаций.

Затем полученные теоретические выводы были подтверждены экспериментально. Для этого было создано многомодовое многопараметрическое акустоэлектронное устройство (рисунок 2).

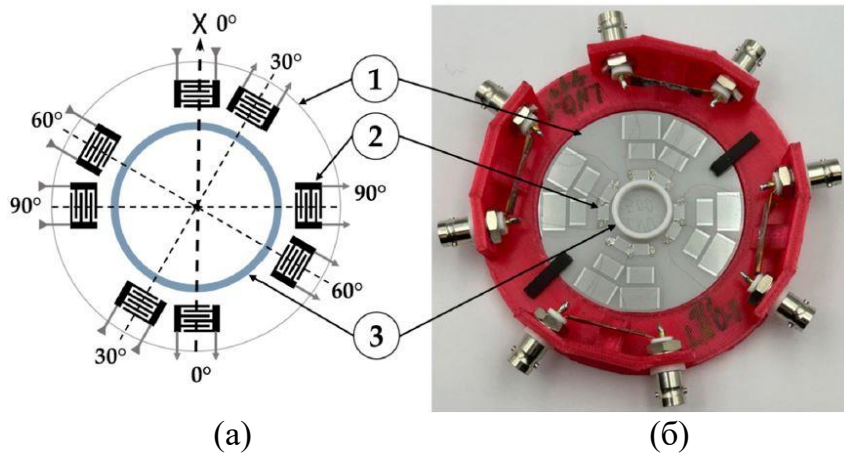


Рисунок 2. Схематический вид а) и б) фотография экспериментального образца с набором акустических линий задержки (каналов) на одной пьезоэлектрической пластине. Акустические каналы ориентированы под углами $\Theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$, и 90° относительно кристаллографической оси X. 1 - пьезоэлектрическая пластина, 2 - ВШП, 3 - ячейка диаметром 18 мм.

Основой этого устройства служила пьезоэлектрическая пластина $128^\circ\text{Y LiNbO}_3$ толщиной $h = 500$ мкм и диаметром 3 дюйма. На полированной поверхности пластины были расположены четыре линии задержки по окружности под углами $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ к кристаллографической оси X.

Конструкция каждой линии задержки представляет собой два ВШП, один из которых использовался для возбуждения, а другой для приема акустических волн. Каждый ВШП имел 40 пар электродов, апертуру 4.7 мм и рабочую длину волны (λ) 200 мкм. Нормированная толщина пластины $h/\lambda = 2.5$.

При анализе теоретически полученных дисперсионных зависимостей фазовой скорости акустических волн от h/λ было видно, что при $h/\lambda = 2.5$ существует большое количество разных типов акустических волн. Важно отметить, что чем больше становится h/λ , тем больше наблюдается акустических волн с близкими скоростями. В связи с этим ВШП, имея 40 пар электродов, обеспечивала узкую полосу пропускания, составляющую 2.5%, и хорошее частотное разрешение (± 0.5 МГц) при близких фазовых скоростях (± 200 м/с).

В центре пластины была расположена жидкостная ячейка из тefлона диаметром 20 мм, с высотой и толщиной стенок 3 мм и 1 мм, соответственно, и объёмом 764 мм³. Ячейка крепилась к поверхности пластины с помощью цианакрилатного клея. Расстояние от каждого ВШП до жидкостной ячейки составляло 1 мм.

Набор линий задержки на поверхности пластины создавался при помощи безмасочной фотолитографии. На экструзионном принтере VolgoBot A4 PRO 3D была также изготовлена соответствующая оснастка (рисунок 2.б).

Амплитудно-частотные характеристики созданных линий задержки измерялись при помощи векторного анализатора цепей Keysight E5061B.

В качестве исследуемых жидкостей были изготовлены водные растворы хлорида натрия (NaCl), глюкозы (C₆H₁₂O₆), лимонной кислоты (C₆H₈O₇), глутамата натрия (C₅H₈NO₄Na) и экстракта полыни в концентрациях 0.02% и 0.9%. Для приготовления водных растворов 0.2 г и 9 г порошки соответствующих веществ отмеряли на лабораторных аналитических весах CAS CAUW-220D (CAS Corp., Сеул, Республика Корея) и растворяли в 1 л дистиллированной воды.

Акустическим откликом на присутствие жидкости на поверхности пластины были выбраны вносимые потери S_{12} (дБ), измеряемые при помощи векторного анализатора цепей Keysight E5061B (Рисунок 3).

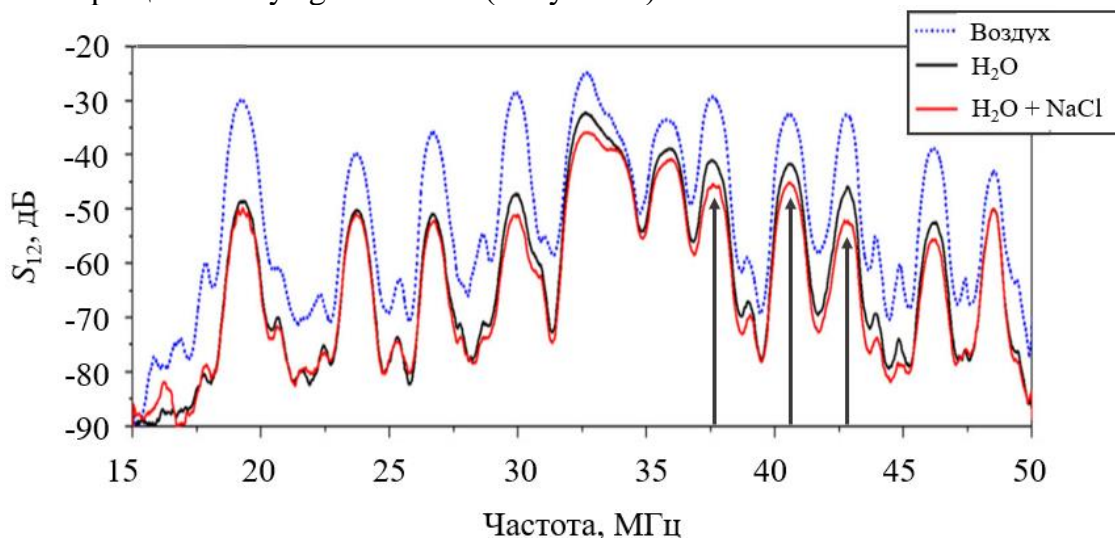


Рисунок 3. Типичный вид частотной зависимости вносимых потерь S_{12} акустических волн в пластине 128°Y+90 LiNbO₃ с дистиллированной водой (черная линия) и 0.9% водным раствором NaCl ($\sigma = 1.4$ См/м) (красная линия). Стрелки указывают на некоторые волны с высокими суммарными потерями.

Изменение амплитуды этой величины под действием исследуемых жидкостей $\Delta S_{12} = |S_{12}^{(ж-тб)}| - |S_{12}^{(H_2O)}|$ характеризовало соответствующий отклик акустических волн.

Подобный подход позволил исключить вклад радиационных потерь из-за излучения волны в жидкость из пластины. Это, в свою очередь, позволило сравнивать влияние исследуемых жидкостей на акустические волны, возникающее только из-за различия их физических свойств.

В результате экспериментальных исследований были получены частотные зависимости вносимых потерь S_{12} для пяти вышеуказанных водных растворов с концентрациями 0.02% и 0.9% для четырех направлений распространения пьезоэлектрической пластины 128Y,X+Θ LiNbO₃ (Θ = 0°, 30°, 60°, 90°).

Набор полученных экспериментальных акустических откликов, относящихся к различным акустическим волнам и каналам, был представлен в виде ориентационных гистограмм, отражающих анизотропию пластины (рисунок 4). Как и было предсказано в теории, характеристики акустических волн изменяются под влиянием жидкостей в зависимости от направления их распространения. Следует отметить, что из-за разницы в параметрах материала пьезоэлектрической пластины, используемой в эксперименте, и данных из известных источников, невозможно провести точное количественное сравнение теоретических и экспериментальных данных. Однако общее качественное сравнение показывает хорошее соответствие между теоретическими и экспериментальными результатами.

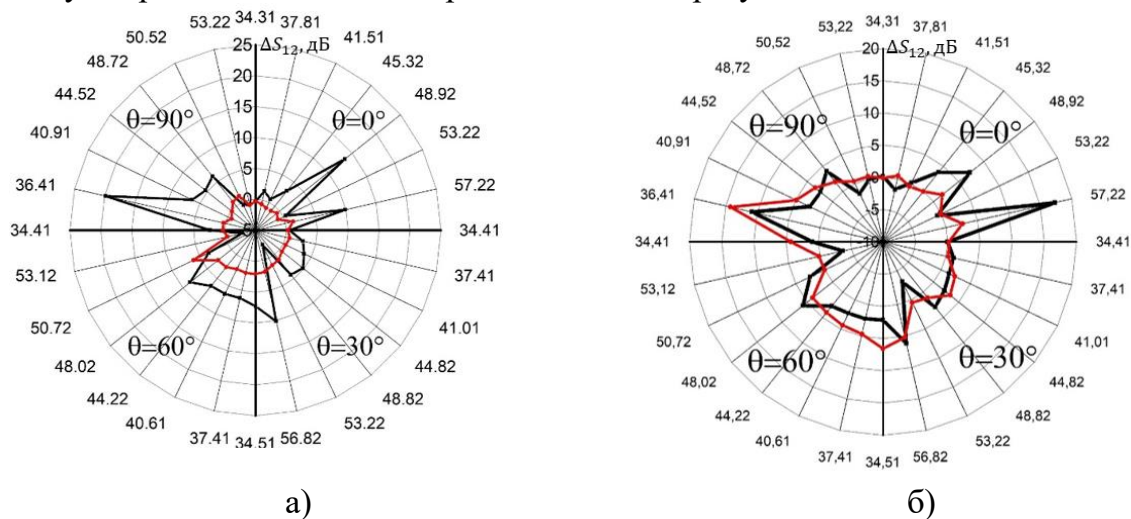


Рисунок 4. Комбинированные ориентационные гистограммы ΔS_{12} водных растворов глутамата натрия (а) и NaCl (б) с концентрациями 0.02% (красная линия) и 0.9% (черная линия), измеренные с использованием всех каналов пластины 128°Y LiNbO₃ с нормированной толщиной $h/\lambda = 2.5$ в заданном диапазоне частот. По углу гистограммы отложена частота акустической моды в МГц для каждого угла Θ, по радиусу отложено значение ΔS_{12} .

Видно, что построенные экспериментальные ориентационные гистограммы ΔS_{12} для различных углов распространения и частот отличаются друг от друга как по форме, так и по площади. Было обнаружено, что акустические отклики на присутствие одного и того же образца жидкости в разных направлениях распространения могут отличаться в несколько раз, так же, как и отклики от волн с разными частотами, распространяющихся в одном направлении.

Таким образом, был сделан вывод о возможности использования ориентационных гистограмм изменения модуля вносимых потерь (ΔS_{12}) различных типов акустических волн в сильно анизотропных пьезоэлектрических пластинах для детекции слабовязких жидкостей, находящихся в контакте с пластиной, по их физическим свойствам. Различная степень влияния исследованных жидкостей на акустические волны, распространяющиеся в различных направлениях анизотропных пластин, обусловлена как электрическими, так и механическими свойствами самих жидкостей и поляризацией соответствующих волн.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию влияния анизотропии пьезоэлектрических пластин на детектирование фазового перехода вода-лёд, возникающего на поверхности пластины, при помощи акустических волн.

В рамках теоретического анализа было рассмотрено распространение акустических волн в таких структурах, как «воздух-пьезоэлектрическая пластина-воздух», «воздух-пьезоэлектрическая пластина-дистиллированная вода» и «воздух-пьезоэлектрическая пластина-лед» (рисунок 5).

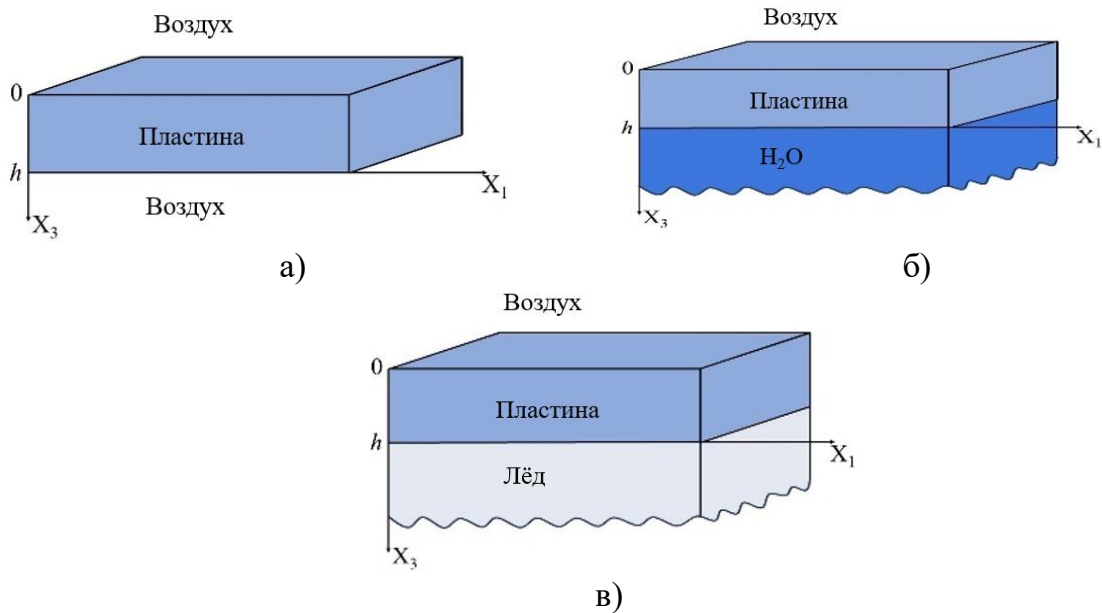


Рисунок 5. Геометрия теоретически рассмотренных структур: «воздух - пьезоэлектрическая пластина – воздух» (а), «воздух - пьезоэлектрическая пластина - дистиллированная вода» (б) и «воздух - пьезоэлектрическая пластина – лёд» (в).

Также как и в первой главе были записаны материальные уравнения для всех контактирующих сред. Решение искалось в виде плоской неоднородной волны. Для каждой из сред были найдены собственные значения и собственные вектора. Затем, используя граничные условия (3)-(6), была записана матрица граничных условий для каждой из задач.

$$X_3 = 0:$$

$$T_{i3}^{pz} = 0; \Phi^{pz} = \Phi^{\text{воздух}}; D_3^{pz} = D_3^{\text{воздух}}, \quad (3)$$

$$X_3 = h \text{ (контакт с воздухом):}$$

$$T_{i3}^{pz} = 0; \Phi^{pz} = \Phi^{\text{воздух}}; D_3^{pz} = D_3^{\text{воздух}}, \quad (4)$$

$$X_3 = h \text{ (контакт H}_2\text{O):}$$

$$U_3^{pz} = U_3^{H_2O}; T_{33}^{pz} = T_{33}^{H_2O}; T_{13}^{pz} = T_{23}^{pz} = 0; \Phi^{pz} = \Phi^{H_2O}; D_3^{pz} = D_3^{H_2O}, \quad (5)$$

$$X_3 = h \text{ (контакт со льдом):}$$

$$U_i^{pz} = U_i^{\text{лёд}}; T_{i3}^{pz} = T_{i3}^{\text{лёд}}; \Phi^{pz} = \Phi^{\text{лёд}}; D_3^{pz} = D_3^{\text{лёд}}. \quad (6)$$

Итерационным методом находилось такое значение фазовой скорости акустической волны, при котором детерминант такой матрицы обращался в нуль.

Следует отметить, что расчет характеристик акустических волн в присутствии льда проводился с учетом влияния температуры (-15°C) на материальные постоянные пьезоэлектрической подложки.

В результате теоретического анализа были получены значения затухания (Γ , дБ/λ) и величины компонент механического смещения (U_1, U_2, U_3) для пластин $Y, X+\Theta$ - LiNbO_3 , $128^{\circ}Y, X+\Theta$ - LiNbO_3 , $36^{\circ}Y, X+\Theta$ - LiTaO_3 в диапазоне частот 20 - 60 МГц для углов распространения $\Theta = 0^{\circ}, 30^{\circ}, 60^{\circ}, 90^{\circ}$ от кристаллографической оси X . Для структуры на рисунке 5а была решена задача распространения акустических волн при металлизации поверхности пластины в плоскости $X_3 = h$. Это позволило рассчитать также коэффициент электромеханической связи (k^2).

Анализ полученных результатов показал, что фазовая скорость и поляризация акустических волн высших порядков вблизи частоты отсечки практически не изменяется в присутствии жидкости или льда. Это может быть связано с малым акустическим импедансом воды и льда по сравнению с пьезоэлектрическими пластинами. Однако, в присутствии нагрузки появилось затухание акустических волн, связанное с радиационными потерями при их распространении. В основном, эти потери были больше в присутствии льда, чем в присутствии воды, что совпадает с экспериментально полученными данными. Анализ также показал, что теоретически рассчитанное затухание акустических волн меньше, чем величины, полученные экспериментально. Это связано с тем, что при теоретическом анализе не учитываются потери на рассеяние акустических волн на дефектах в ледовой нагрузке.

Также было обнаружено, что изменение затухания при фазовом переходе вода/лед зависит от материала пластины. Например, для танталата лития величина этих изменений меньше, чем для ниобата лития. Хотя эти два материала относятся к одному кристаллографическому классу и имеют похожий вид анизотропии, их плотности отличаются почти в два раза. Это увеличивает разницу импедансов между пластиной и нагрузкой.

Для проверки выводов теории были созданы три акустоэлектронных устройства на основе пьезоэлектрических пластин $Y, X+\Theta$ LiNbO_3 ($h = 500$ мкм), $128^{\circ}YX+\Theta$ LiNbO_3 ($h = 500$ мкм), $36^{\circ}YX+\Theta$ LiTaO_3 ($h = 350$ мкм) по методике, описанной в первой главе. Измерения вносимых потерь S_{12} для каждой пары ВШП выполнялись в частотном диапазоне $f = 3 - 60$ МГц с точностью менее ± 0.1 дБ при атмосферном давлении и температурах от $+20^{\circ}\text{C}$ до -20°C .

Для измерения S_{12} использовался векторный анализатор цепей KEYSIGHT 5061B (Keysight, SantaRosa, CA, USA), работающий в амплитудном формате $S_{12}(f)$ (рисунк 6). Для изменения температуры использовался Climatic chamber UC-20CE (Terchy, Nantou, Taiwan), работающий в температурном диапазоне -60°C до $+50^{\circ}\text{C}$. Вначале измерения проводились с дистиллированной водой при температуре 20°C . При этом вязкость воды (η) была равна 1.03 сПуаз, а ее проводимость (σ) была меньше 0.001 См/м. Затем температура понижалась до -15°C , при этом жидкость превращалась в лед, а акустический сигнал начинал изменяться. После стабилизации сигнала измерения вносимых потерь S_{12} повторяли в присутствии образовавшегося льда. Акустическим откликом на фазовый переход вещества из одного агрегатного состояния в другое служила величина $\Delta S_{12} = \left| S_{12}^{(\text{лед})} \right| - \left| S_{12}^{(H_2O)} \right|$,

которая позволяла сравнивать влияние фазового перехода на волны высших порядков в разных направлениях распространения и в разных материалах. Благодаря малому проникновению волн в жидкость (0.1 мкм) по сравнению с ее толщиной (>1 мм) форма и объем тестового образца не влияли на результаты измерений. В экспериментах использовались образцы жидкости с объемом 500 мкл.

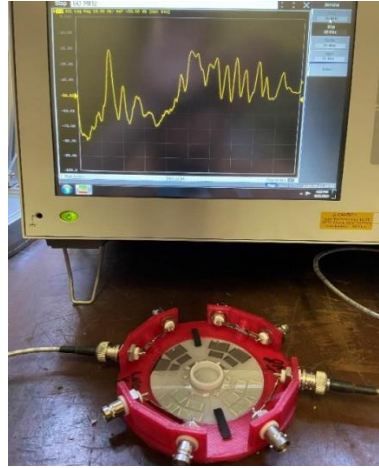


Рисунок 6. Установка и образец для проведения экспериментов.

Эксперименты показали, что в большинстве случаев переход воды из жидкого в твердое состояние в основном сопровождается увеличением вносимых потерь S_{12} и положительными значениями откликов ΔS_{12} . Было показано, что величина ΔS_{12} зависит от направления распространения, частоты волны, толщины и материала пластины. На рисунке 7 приведены типичные частотные зависимости вносимых потерь S_{12} (а) и их изменения ΔS_{12} (б) при отсутствии нагрузки (+20°C, черная линия), в присутствии дистиллированной воды (+20°C, красная линия) и в присутствии льда (-15°C, синяя линия) в кювете.

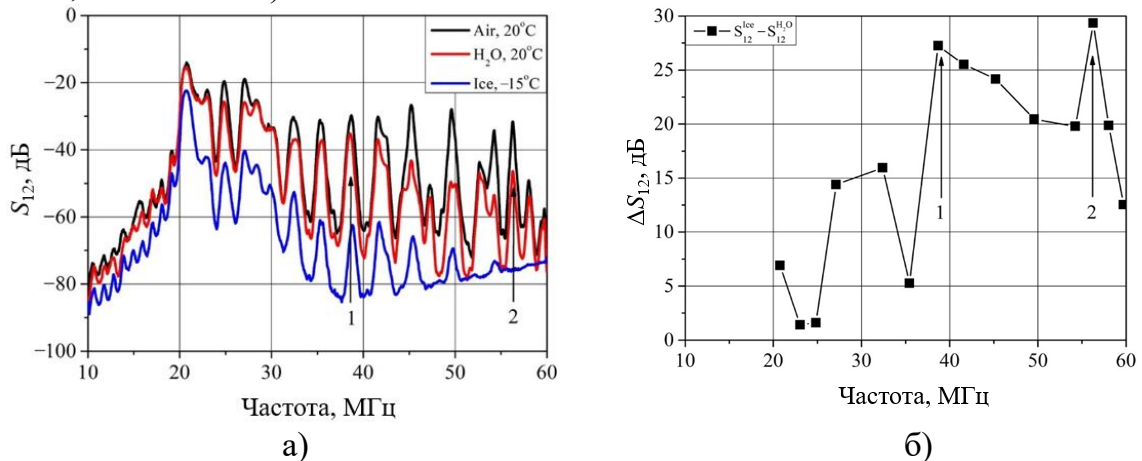


Рисунок 7. Типичный вид частотных зависимостей вносимых потерь S_{12} (а) и их изменения ΔS_{12} (б), измеренных в пластине $36^\circ\text{YX-LiTaO}_3$ при $h/\lambda = 2.5$ в отсутствии нагрузки (+20°C, черная линия), в присутствии дистиллированной воды (+20°C, красная линия) и льда (-15°C, синяя линия). Волны с наибольшими значениями ΔS_{12} : $f = 39.69$ МГц, $\Delta S_{12} = 27.2$ дБ (1), $f = 56.69$ МГц, $\Delta S_{12} = 29.3$ дБ (2).

На рисунке 7 отмечены стрелками акустические волны с максимальными значениями ΔS_{12} : $f = 39.69$ МГц, $\Delta S_{12} = 27.2$ дБ (1), $f = 56.69$ МГц, $\Delta S_{12} = 29.3$ дБ (2). Анализ экспериментальных результатов показал, что значения максимальных откликов ΔS_{12} в разных пьезопластинах и акустических каналах меняются в широких пределах от 14 до 42 дБ (0.8 - 2.3 дБ/мм), а минимальные значения откликов ΔS_{12} находятся в пределах от 0.9 до 3 дБ (0.05 - 0.17 дБ/мм). Это означает, что в каждой пластине, в зависимости от кристаллографического направления, существуют как волны с высокой чувствительностью к фазовому переходу, так и волны почти не чувствительные к нему. Кроме того, была обнаружена уникальная ситуация для пластины $Y, X+60^\circ LiNbO_3$ ($h = 500$ мкм), при которой полные потери для волны Лэмба с $f = 18.13$ МГц уменьшились при трансформации воды в лед и составили величину $\Delta S_{12} = -0.7$ дБ/мм.

Третья глава диссертации посвящена исследованию влияния анизотропии пьезоэлектрических пластин на взаимодействие акустических волн различных типов с биологическими и вязкими суспензиями, расположенными на поверхности пластины.

Как было показано в первой главе анизотропия пьезоэлектрических пластин позволяет различать слабвязкие жидкости, в том числе, характеризующиеся различным вкусом. Было высказано предположение, что вкус может быть описан совокупностью физических параметров. Также можно предположить, что набором физических параметров могут быть охарактеризованы и биологические жидкости.

В диссертации многомодовый многопараметрический метод был использован для измерения ориентационных гистограмм для коллоидных растворов на основе питательной среды Лурье-Бертрана, содержащих аэробные грамположительные *Rhodococcus sp.* или грамотрицательные *Metylobacterium sp.* бактерии, капсулированные наночастицами железа, находящихся в контакте с пластиной $128^\circ Y LiNbO_3$. В данном эксперименте использовали внутреннюю концентрическую окружность пар ВШП ($\lambda = 200$ мкм) экспериментального образца на основе пластины $128Y, X+\Theta LiNbO_3$. Измерения вносимых потерь S_{12} проводились в диапазоне частот 15 – 70 МГц в амплитудно-частотном режиме. Для каждой акустической волны во всех четырёх акустических каналах были измерены значения S_{12} при ее взаимодействии с исследуемыми жидкостями. В качестве опорного сигнала было использовано значение $S_{12}^{H_2O}$ для дистиллированной воды.

Акустическим откликом, как и ранее, служила величина $\Delta S_{12} = \left| S_{12}^{(ж-ть)} \right| - \left| S_{12}^{(H_2O)} \right|$. В результате, по полученным данным были построены ориентационные гистограммы для чистой питательной среды Лурье-Бертрана (Л-Б), а также для коллоидных растворов на основе питательной среды Лурье-Бертрана, содержащих аэробные грамположительные *Rhodococcus sp.* или грамотрицательные *Metylobacterium sp.* бактерии, капсулированные наночастицами железа (рисунок 8).

Видно, что вносимые потери для всех волн Лэмба в канале $\Theta = 30^\circ$ уменьшаются и разница $\Delta S_{12} = -15$ дБ для всех трех жидкостей. В канале $\Theta = 60^\circ$ обе культуральные среды в одинаковой степени увеличивают S_{12} , а вот питательная среда, наоборот, их уменьшает. Различие всех трех жидкостей видно в канале $\Theta = 90^\circ$. Видно, что для волн, распространяющихся в этом направлении, присутствие грамположительных бактерий вызывает большее затухание, чем присутствие грамотрицательных бактерий. Возможно, это связано с различием в архитектуре их клеточной стенки. Присутствие среды Л-Б, которая содержит бычий альбумин и

железо (в форме цитрата или хлорида), может стимулировать биосинтез капсульных полисахаридов у грамположительных бактерий, что приведет к увеличению вязкости коллоидного раствора. Этот эффект практически не наблюдается для грамотрицательных бактерий. Именно эту тенденцию мы наблюдаем в эксперименте.

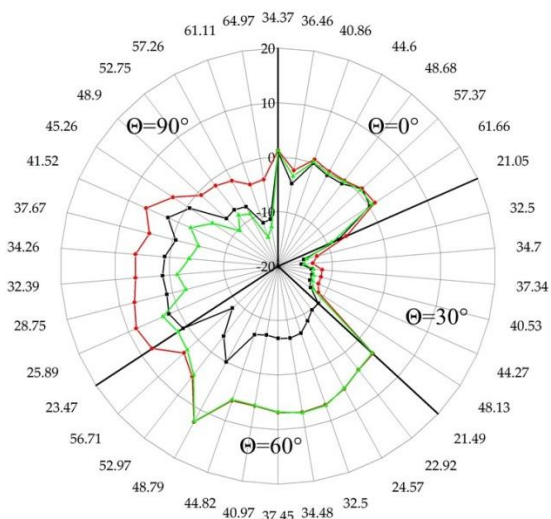


Рисунок 8. Ориентационная гистограмма изменения вносимых потерь ΔS_{12} акустических волн в пластине $128^\circ Y, X + \Theta$ ниобата лития $h = 500$ мкм при контакте с культуральными средами с различными клетками. Питательная среда (черная линия), культура клеток *Rhodococcus sp.* (красная линия), культура клеток *Metylobacterium sp.* (зеленая линия). По углу гистограммы отложена частота акустической моды в МГц, по радиусу отложено ΔS_{12} .

Как уже говорилось во введении, важным практическим аспектом является контроль загрязнения различных технологических жидкостей, например различных масел. В данном разделе диссертации была проведена апробация многомодового многопараметрического метода для идентификации вязких сред на основе силиконового масла с микрочастицами металлов и их оксидов. Были изготовлены два коллоидных раствора на основе силиконового масла марки ПФМС-2/5л с добавлением 1% массы микрочастиц Fe и Fe_3O_4 . Изготовленные растворы помещались в кювету на поверхности пластины $128^\circ Y, X + \Theta$ LiNbO₃.

Вносимые потери S_{12} для акустических волн во всех каналах на различных частотах при контакте с чистым силиконовым маслом, силиконовым маслом + 1% массы Fe, силиконовым маслом + 1% массы Fe_3O_4 были измерены методом, описанным выше. На рисунке 9 представлены ориентационные гистограммы анизотропии изменения вносимых потерь ΔS_{12} для акустических волн в пластине $128^\circ Y, X + \Theta$ LiNbO₃, находящейся в контакте с вышеуказанными жидкостями.

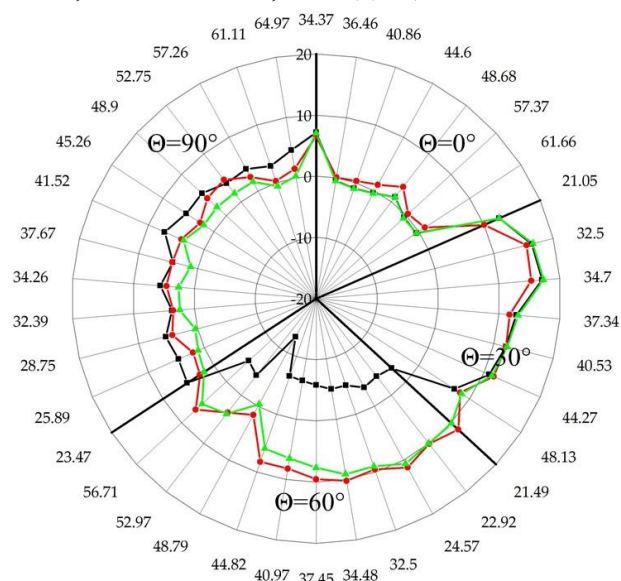


Рисунок 9. Ориентационная гистограмма изменения вносимых потерь ΔS_{12} акустических волн в пластине $128^\circ Y, X + \Theta$ ниобата лития $h = 500$ мкм при контакте с вязкими средами. Силиконовое масло (черная линия), силиконовое масло + 1% массы Fe (красная линия), силиконовое масло + 1% массы Fe_3O_4 (зеленая линия). По углу гистограммы отложена частота акустической моды в МГц, по радиусу отложено ΔS_{12} .

В четвертой главе было экспериментально исследовано влияния дистиллированной воды на радиационные потери акустических волн Лэмба высших порядков в анизотропных пьезоэлектрических пластинах. Для выяснения вклада различных механизмов поглощения в затухание акустических волн использовали такие пластины как 64°Y LiTaO_3 , 36°Y LiTaO_3 , YZ LiTaO_3 , $128^\circ\text{Y LiNbO}_3$, YZ-LiNbO_3 и ST-кварц. Толщина этих пластин была равна 500 мкм.

Пластины имели одну шлифованную (верхняя) и одну полированную (нижняя) поверхности. На полированной поверхности были расположены входной и выходной ВШП, период которых λ составлял либо 200, либо 300 мкм. Преобразователи имели 40 пар электродов.

Измерения проводились с помощью векторного анализатора цепей KEYSIGHT E5061B. Вначале измерялись вносимые потери $S_{12}(f)$ на воздухе, а затем с дистиллированной водой. Разница $\Delta S_{12} = |S_{12}^{(H_2O)}| - |S_{12}^{(\text{воздух})}|$ исключала влияние потерь в преобразователях и служила мерой волноводных и излучательных потерь.

Измеренные значения изменения вносимых потерь ΔS_{12} сопоставлялись со скоростями V_n и упругими смещениями $\{U_1, U_2, U_3\}$ волн на поверхности пластины, которые рассчитывались численно. Сопоставление проводилось для таких комбинаций как: малые скорости V_n - большие смещения U_3 ; большие скорости V_n - малые смещения U_3 . Таким образом, проводился анализ, какой из эффектов волноводный или излучательный является доминирующим. Идентификация волн осуществлялась по совпадению расчетных и экспериментальных фазовых скоростей. В пластине ST кварца (рисунок 10) у двух акустических волн ($f = 10.38$ и 11.66 МГц соответственно) доминирующим является волноводный эффект, т.е. при равенстве нормальной компоненты механического смещения ($U_3 = 1.5$) и, следовательно, равенстве излучательного механизма радиационных потерь, вторая мода с большей скоростью (3500 м/с) обладает большими радиационными потерями (19 дБ), чем первая волна с меньшей скоростью (3100 м/с и 15.5 дБ, соответственно).

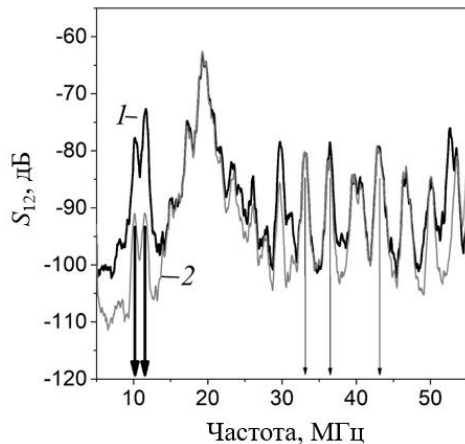


Рисунок 10. Частотная зависимость вносимых потерь волн Лэмба разных порядков в пластине ST, X-SiO_2 толщиной $h/\lambda = 1.67$. 1 — вносимые потери без жидкости, 2 — вносимые потери с дистиллированной водой. Толстыми и тонкими стрелками указаны моды с большими и малыми радиационными потерями, соответственно.

В пластине $36^\circ\text{YX-LiTaO}_3$ (рисунок 11) обнаружены низкоскоростные сильно излучающие моды и высокоскоростные слабо излучающие моды. У волны с низкой скоростью (4150 м/с) и большой нормальной компонентой $U_3 = 1.8$ радиационные потери составили 33 дБ, а у волны с высокой скоростью (5578 м/с), но малой компонентой $U_3 = 0.048$ они равнялись всего 3 дБ.

Это означает, что большим U_3 соответствуют большие радиационные потери даже при малых скоростях, а малым U_3 — малые радиационные потери даже при больших скоростях. Это говорит о доминирующей роли нормального смещения U_3 в формировании радиационных потерь этих волн.

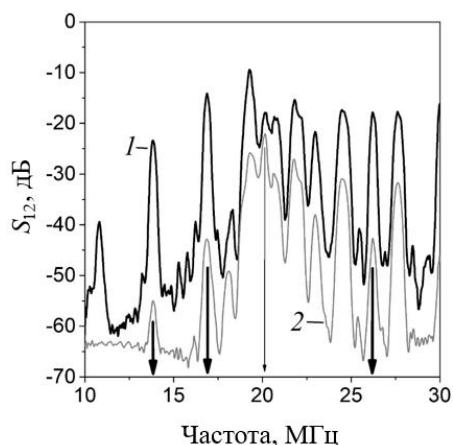


Рисунок 11. Частотная зависимость вносимых потерь волн Лэмба разных порядков в пластине $36^\circ\text{YX-LiTaO}_3$ толщиной $h/\lambda = 1.67$. 1 – вносимые потери без жидкости, 2 – вносимые потери с дистиллированной водой. Толстыми стрелками указаны моды с большими радиационными потерями, тонкими – моды с малыми радиационными потерями.

Наконец, волн с большими U_3 , но малыми радиационными потерями ΔS_{12} и мод с малыми U_3 , но большими радиационными потерями ΔS_{12} нами не обнаружено ни при каком соотношении скоростей $V_n/V_{жс}$ и ни в одном образце. Это позволило сделать вывод о том, что доминирующий вклад в формирование радиационных потерь вносит излучательный механизм.

В заключении указано, что теоретически показана и экспериментально подтверждена возможность идентификации слабовязких жидкостей при помощи использования многообразия акустических волн высших порядков в пьезоэлектрических пластинах. По результатам экспериментальных измерений построены соответствующие ориентационные гистограммы анизотропии ΔS_{12} для различных типов акустических мод. Было обнаружено, что они индивидуальны для разных веществ и отличаются по форме, площади и положению экстремумов. Теоретически показано, что влияние различных жидкостей на различные акустические моды обусловлено как электрическими, так и механическими свойствами самих жидкостей и поляризацией соответствующих мод. Несмотря на то, что механические свойства использованных жидкостей близки между собой, затухание различных мод в их присутствии обусловлено не только различием их электрических параметров [1*-3*].

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование влияния фазового перехода вода-лед на свойства акустических волн высших порядков в зависимости от анизотропии пьезоэлектрических пластинах. Показано, что величина вносимых потерь S_{12} исследованных волн может уменьшаться, увеличиваться или оставаться относительно стабильной при фазовом переходе вода-лед на поверхности пластины в зависимости от направления распространения волны и ее порядка. Наибольшее уменьшение $\Delta S_{12} = 42.1$ дБ из-за оледенения произошло для волны с частотой 40.53 МГц, распространяющейся в пластине $\text{YX}+30^\circ \text{LiNbO}_3$. Наименьшее изменение $\Delta S_{12} = 0.9$ дБ из-за оледенения наблюдалось для волны на частоте 56.5 МГц, распространяющейся в пластине $\text{YX}+60^\circ \text{LiNbO}_3$. Кроме того, было также обнаружено, что в пластине $\text{YX}+30^\circ \text{LiNbO}_3$ переход из воды в лед приводит к полному поглощению всех акустических волн в указанном диапазоне частот (10-60 МГц), за исключением одной [4*].

Экспериментально исследована зависимость затухания волн Лэмба из-за излучения в невязкую непроводящую жидкость (радиационные потери) от 1) соотношения фазовых скоростей волн в пластине V_n и жидкости $V_{жс}$ и от 2) отношения нормальной компоненты механического смещения U_3 к продольной компоненте U_1 в волне рассматриваемого номера n . Показано, что доминирующей величиной при формировании радиационных потерь является U_3/U_1 : для $U_3/U_1 \ll 1$

излучение волн Лэмба в жидкость и величина радиационных потерь малы даже при $V_n \gg V_{ж}$. Для $U_3/U_1 \geq 1$ излучение в жидкость и величина радиационных потерь велики и могут достигать значений, сравнимых с таковыми для поверхностных акустических волн в том же материале (~ 5 дБ/мм). Зависимость затухания волн Лэмба от соотношения скоростей V_n и $V_{ж}$ намного слабее [5*, 6*].

Результаты диссертации опубликованы в следующих отечественных и международных рецензируемых изданиях:

1*. Ageykin N., Anisimkin V., Smirnov A., Fionov A., Li P., Qian Zh., Ma T., Awasti K., Kuznetsova I. An electronic «tongue» based on multimode multidirectional acoustic plate wave propagation // Sensors. – 2024. – 24. – 6301. – <https://doi.org/10.3390/s24196301>

2*. Агейкин Н.А., Анисимкин В.И., Воронова Н.В., Тельминов О.А., Шамин Е.С. Получение и обработка акустических откликов волн Лэмба в датчиках водных растворов базовых вкусов. Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2024. – Т.16. – №3. – С. 325-330. (перевод Ageikin N.A., Anisimkin V.I., Voronova N.V., Telminov O.A., Shamin E.S. Measurement and processing of the acoustic Lamb wave responses towards water solutions of basic flavors // Radioelectronika. Nanosistemy. Informacionnye Technologii. – 2024. – 16(3). – P. 325-330. – DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.325).

3*. Агейкин Н.А., Анисимкин В.И., Смирнов А.В., Фионов А.С. Акустоэлектронный датчик вкуса // Труды XXXVI Сессии РАО, г. Москва, 2024.- С. 601. DOI: 10.34756/GEOS.2024.17.38901

4*. Smirnov A.V., Anisimkin V.I., Ageykin N.A., Datsuk E.R., Kuznetsova I.E. Influence of lamb wave anisotropy on detection of water-to-ice phase transition // Sensors. – 2024. – 24. – 7969. – <https://doi.org/10.3390/s24247969>

5*. Агейкин Н.А., Анисимкин В.И., Воронова Н.В., Смирнов А.В. Анализ радиационного поглощения акустических волн Лэмба в пластинах, нагруженных невязкой непроводящей жидкостью // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т. 68. – №. 10. – С. 1030-1034 DOI: 10.31857/S0033849423100029. (перевод: Ageikin N. A., Anisimkin V. I., Voronova N. V., Smirnov A. V. Analysis of Radiation Absorption of Acoustic Lamb Waves in Plates Loaded with Inviscid Nonconducting Liquid // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2023. – Т. 68. – №. 10. С. 1243-1247. DOI: 10.1134/S1064226923100029.)

6*. Агейкин Н.А., Анисимкин В.И., Смирнов А.В. Радиационные потери акустических волн Лэмба в пластинах, нагруженных невязкой непроводящей жидкостью // Труды XXXVII Сессии Российского акустического общества. – 2025. – С. 600. DOI:10.34756/GEOS.2025.17.39301

Список цитированной литературы:

1. Thirstrup C., Deleebeeck L. Review on electrolytic conductivity sensors // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2021. – V. 70. – P. 1008222. – DOI: 10.1109/TIM.2021.3083562.

2. Zaitsev B. D., Semyonov A. P., Teplykh A. A., Borodina I. A. A new liquid sensor based on a piezoelectric resonator with a radial electric field // Ultrasonics. – 2022. – V. 119. – P. 106603. – DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106603.

3. Zaitsev B. D., Borodina I. A., Teplykh A. A. Compact liquid analyzer based on a resonator with a lateral excitation electric field // Ultrasonics. – 2022. – V. 126. – P. 106814. – DOI: 10.1016/j.ultras.2022.106814.

4. Anisimkin V. I., Voronova N. V. New modification of the acoustic Lamb waves and its application for liquid and ice sensing // *Ultrasonics*. – 2021. – V. 116. – P. 106496. – DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106496.
5. Щербаков В.Н., Власков Г.А. Электролитические свойства растворов аммиака и кондуктометрический контроль качества теплоносителя ТЭС при высоких температурах и давлениях // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2013. – Т. – 12. – № 7. – DOI: 10.12737/2029
6. Власов Ю.Г., Легин А.В., Рудницкая А.М. Мультисенсорные системы типа электронный язык - новые возможности создания и применения химических сенсоров // *Успехи химии*. – 2006. – Т. 75. – № 2. – С. 141-150. – EDN HSQINH.
7. Майстренко В. Н., Евтюгин Г. А., Сидельников А. В. Вольтамперометрический электронный язык // *Проблемы аналитической химии: коллективная монография / Российская академия наук, Отделение химии и наук о материалах, Научный совет по аналитической химии. Том 14. – Москва: Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук "Издательство "Наука". – 2011. – С. 285-313.*
8. Анисимкин В.И., Кузнецова И.Е., Шамсутдинова Е.С. Особенности детектирования электрических характеристик проводящих жидкостей с помощью нормальных акустических волн// *Радиотехника и электроника*. – 2022. – Т.67. – №8. – С. 807-815. – DOI: 10.31857/S0033849422080022
9. Anisimkin V., Shamsutdinova E., Li P., Wang B., Zhu F., Qian Z., Kuznetsova I. Selective detection of liquid viscosity using acoustic plate waves with in-plane polarization // *Sensors*. – 2022. – 22. – 2727-2737. – 10.3390/s22072727
10. Balantine D.S., White R.M., Martin S.J., Ricco A.J., Zellers E.T., Frye G.C., Wohltjen H. *Acoustic wave sensors: Theory, design and physico-chemical applications* // NY: Academic Press. – 1996. – 2996. – P. 436.
11. Smirnov A., Anisimkin V., Voronova N., Shamsutdinova E., Li P., Azzin H., Qian Z., Ma T., Kuznetsova I. Multimode design and piezoelectric substrate anisotropy use to improve performance of acoustic liquid sensors // *Sensors*. – 2022. – 22. – P. 7231-7241.
12. Martin S.J., Ricco A.J., Nimczyk T.M., Frye G.C. Characterization of SH acoustic plate mode liquid sensor // *Sensors and Actuators*. – 1989. – V.20. – P. 253-268.
13. Никитина С.Ю., Кумченко Т.А., Рудаков О.Б., Дроздова Е.В. Применение методики «Электронный нос» для оценки качества пищевого этанола // *Вестник ВГУ, серия: Химия. Биология. Фармация*. – 2015. – № 1. – С. 26-35.
14. Белоусов Н.С., Верхов С.В., Кочетова Ж.Ю., Кравченко А.А. Электронный нос для идентификации авиационных масел // *Донецкие чтения 2021: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности : материалы VI Международной научной конференции, Донецк, 26–27 октября 2021 года. Том 1. – Донецк: Донецкий национальный университет. – 2021. – С. 166-169.*
15. Shiokawa S., Kondoh J. Surface acoustic waves sensor for liquid-phase applications // *IEEE Ultrasonics Symposium Proc. Caesars Tahoe, NV, USA*. – 1999. –P. 445- 452.