

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
им. В.А. КОТЕЛЬНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

На правах рукописи



АГЕЙКИН НИКИТА АЛЕКСЕЕВИЧ

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

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Кузнецова Ирен Евгеньевна

Москва – 2025

Оглавление

| | |
|--|----|
| Список сокращений и условных обозначений..... | 4 |
| Введение..... | 5 |
| Глава 1. Исследование влияния анизотропии пьезоэлектрических пластин на взаимодействие акустических волн различных типов с жидкостями, расположенными на поверхности пластины..... | 24 |
| 1.1 Распространение акустических волн различных типов в структуре «пьезоэлектрическая пластина - слабвязкая жидкость» | 24 |
| 1.2 Разработка многопараметрического метода определения «вкуса» жидкостей на основе акустических волн различных типов в анизотропных пьезоэлектрических пластинах | 35 |
| 1.3. Выводы к главе 1..... | 51 |
| Глава 2. Исследование влияния анизотропии пьезоэлектрических пластин на детектирование фазового перехода вода-лёд, возникающего на поверхности пластины, при помощи акустических волн | 54 |
| 2.1 Теоретический анализ влияния направления распространения акустических волн различных типов на изменение их свойств из-за фазового перехода вода-лед, возникающего на поверхности пьезоэлектрической пластины..... | 54 |
| 2.2 Экспериментальное исследование влияния анизотропии пьезоэлектрических пластин на особенности распространения в них акустических волн различных типов в присутствии фазового перехода вода-лед на поверхности пластины..... | 68 |
| 2.3. Выводы к главе 2..... | 74 |
| Глава 3. Исследование влияния анизотропии пьезоэлектрических пластин на взаимодействие акустических волн различных типов с биологическими и вязкими суспензиями, расположенными на поверхности пластины | 76 |

| | |
|--|-----|
| 3.1 Влияние биологических суспензий, содержащих различные бактериальные клетки, на свойства акустических волн различных типов в пьезоэлектрических пластинах в зависимости от их анизотропии | 77 |
| 3.2 Влияние вязкой суспензии на свойства акустических волн различных типов в пьезоэлектрических пластинах в зависимости от их анизотропии | 81 |
| 3.3. Выводы к главе 3..... | 84 |
| Глава 4. Экспериментальное исследование влияния дистиллированной воды на радиационные потери акустических волн Лэмба высших порядков в анизотропных пьезоэлектрических пластинах | 85 |
| 4.1 Анизотропия радиационных потерь акустических волн Лэмба высших порядков в различных пьезоэлектрических пластинах при контакте с дистиллированной водой | 85 |
| 4.2. Выводы к главе 4..... | 92 |
| Заключение | 94 |
| Список литературы | 97 |
| Список опубликованных работ по теме диссертации..... | 117 |

Список сокращений и условных обозначений

АВП — акустические волны в пластинах

АЧХ — амплитудно-частотная характеристика

ВП – вносимые потери

ВШП — встречно-штыревые преобразователи

ОАВ — объёмная акустическая волна

ПАВ — поверхностная акустическая волна

Введение

Как известно, анизотропия это зависимость физических свойств материала от направления внутри него [1, 2]. С момента зарождения акустоэлектроники в качестве базовых материалов использовались пьезоэлектрики, такие как, ниобат лития (LiNbO_3) танталат лития (LiTaO_3), кварц (SiO_2) и т.д. [3, 4] Все эти материалы являются анизотропными и обладают сегнетоэлектрическими свойствами. Именно на их основе в настоящее время создаются практически все акустоэлектронные устройства [5-13]. Кроме того, активно используются слоистые структуры, состоящие из пьезоэлектрических, полупроводниковых и диэлектрических слоев [14 - 16]. Важной задачей для реализации акустоэлектронных устройств является выбор среза материала и направления распространения акустических волн в нем.

Известно, что скорость и затухание акустических волн зависят от физических свойств материала [1, 2]. Таким образом, в случае анизотропных материалов свойства акустических волн зависят от направления их распространения в этом материале [1, 2, 18].

К настоящему времени разработано множество акустоэлектронных устройств, работающих на объемных (ОАВ) [19 - 22], поверхностных (ПАВ) [23 - 30], волн Лява [31-34] и пластинчатых (АВП) волнах [35 - 39]. Выбор рабочей волны обычно обусловлен её скоростью, поляризацией, частотой и коэффициентом электромеханической связи (k^2). Обычно возбуждение ПАВ и АВП происходит с помощью линии задержки, содержащей два встречно-штыревых преобразователя (ВШП), один из которых является возбуждающим, а другой – принимающим [26, 27]. Использование нескольких линий задержки, расположенных на поверхности одного материала, но возбуждающих волны в разных направлениях, позволит получить больше информации при исследовании различных жидкостей [40].

При контакте звукопровода с жидкостью свойства ПАВ или АВП изменяются. Изменения фазовой скорости волны ($\Delta\varphi$) и затухания (ΔS_{12})

зависят от вязкости (η), плотности (ρ), электропроводности (σ), диэлектрической проницаемости (ϵ) и температуры (T) жидкости. Дополнительно, затухание акустических волн (α) также включает в себя вклад от радиационных потерь $R(U_3)$. Здесь U_3 компонента механического смещения нормальная к поверхности звукопровода и фронту акустической волны [16, 41 - 44].

Зависимость S_{12} от вязкости жидкости является монотонно возрастающей функцией, которые приближаются к насыщению при высоких значениях η [45]. Зависимость S_{12} от σ жидкости имеет форму колокола, и принимает максимальные значения при совпадении максвелловской частоты релаксации жидкости с частотой акустической волны. При увеличении проводимости фазовая скорость жидкости уменьшается и достигает минимума при высоких значениях σ [16]. Это связано с закорачиванием тангенциальных компонент электрического поля, сопровождающего пьезоактивную волну. По мере увеличения диэлектрической проницаемости жидкости влияние ее проводимости на затухание и фазовую скорость пьезоактивной акустической волны уменьшается [46]. Зависимость фазовой скорости акустических волн от температуры T может быть линейной, квадратичной, или кубический [47]. Вносимые потери (S_{12}) существенно не меняются в зависимости от температуры (T), что делает этот параметр наиболее подходящим для анализа жидкостей свойств жидкости [48].

Работ, посвященных исследованию влияния отдельных физических параметров жидкостей, таких как электропроводность [49 - 52], вязкость [53 - 57], диэлектрическая проницаемость [58, 59], на характеристики акустических волн достаточно много. В основном в них используется эталонная жидкость с одним конкретным параметром и одна рабочая волна, которая изменяет свои свойства под действием этой жидкости. Использование большого числа волн с разными характеристиками, причем в разных кристаллографических направлениях одного материала, позволит исследовать жидкости с разной комбинацией физических параметров.

В современных машиностроении, ракетостроении, автомобилестроении различные подвижные элементы изготавливают из металлов, сплавов или композитных материалов [60 - 62]. Однако в процессе эксплуатации за счёт истирания возможно попадание микро или наночастиц в смазочную жидкость, что может привести к изменениям её характеристик. Контроль свойств технических жидкостей требует разработки новых подходов и устройств.

Следует также отметить, что важной практической задачей является контроль свойств таких жидкостей как суспензии с различными добавками, а также водные растворы. Эти жидкости широко используются в пищевой, фармацевтической, косметической, и медицинской промышленности. Например, в современной микробиологии расширяется направление по применению биогенных наночастиц металлов в качестве сенсорных систем [63, 64]. В частности, благодаря способности микробных клеток восстанавливать катионы, происходит формирование наночастиц металлов, а это в свою очередь позволяет контролировать присутствие жизнеспособных микроорганизмов, спор или вирусных частиц в различных растворах и жидких средах и таким образом детектировать биологическое загрязнение таких водных сред [65]. В настоящее время, в качестве общепринятого метода определения присутствия клеток жизнеспособных микроорганизмов в растворах фармацевтических, медицинских и биологических препаратах, субстанциях и других материалах, в соответствии с правилами национальных стандартов, применяют метод прямого посева на индикаторные среды [66]. Соответственно, о стерильности исследуемой жидкости судят по отсутствию роста микроорганизмов и других биологических объектов на специфичных индикаторных средах после инкубации в оптимальных условиях. Наиболее существенным недостатком применения этого метода является длительность его проведения (до 400 часов), а также трудоёмкость и необходимость использования большого количества реактивов [66]. Таким образом, разработка новых методов определения присутствия различных

микроорганизмов, в том числе патогенных, в жидкостях является актуальной задачей.

В пищевой и химической промышленности актуальной задачей является контроль свежести и анализ качества пищевых продуктов и других жидкостей [67 - 69]. Для этих целей разрабатывают устройства, так называемые «электронные носы и языки», на основе кондуктометрических [70], химических [71], вольтамперометрических [72] и акустических [73, 74] методов. Контроль пищевых продуктов и технологических жидкостей позволит обезопасить рынок от поддельных продуктов, продуктов с истекшим сроком годности, не соответствующих ГОСТу и т.д.

Известные и активно разрабатываемые «электронные носы и языки» являются мультисенсорными системами [75 - 78]. Это означает, что для их реализации используется набор датчиков с различными покрытиями [79] или основанных на различных физических принципах [80].

Первые приборы типа «электронный нос и язык» появились в середине 90-х гг. XX века и состояли из газовых сенсоров в сочетании с численными методами обработки сигналов. Для генерации как можно более разнообразных сигналов в приборах начали сочетать различные сенсоры, работающие на разных принципах. Однако такие приборы обладали рядом существенных недостатков: сравнительно высокая стоимость, сопоставимая со стоимостью аналитического оборудования, сложные схемы сопряжения сигналов разного типа от различных сенсоров, достаточно большие габариты и масса.

В связи с этими недостатками появилось два направления развития мультисенсорных систем. В первом на одной подложке формировали датчики разного типа. Например, в [81, 82] представлено устройство, в котором на единой подложке размещены микродатчики емкостного, массочувствительного и калориметрического типов. Второй путь направлен на разработку систем однотипных сенсоров, сформированных на одном кристалле [83-85]. В этом случае сенсоры имеют единый тип сигнала, а

вариация свойств и выходных характеристик достигается через вариацию внутренних параметров и условий работы. Преимуществом этого подхода является то, что стоимость системы из однотипных сенсоров существенно не превышает стоимости отдельного сенсора.

Мультисенсорные системы также используются для распознавания газов [86], анализа отработанного ядерного топлива [87]. В медицине востребованы устройства для определения различных веществ и концентрации этих веществ в водных растворах при различных температурах [88, 89].

Вышеупомянутые кондуктометрические и вольтамперометрические методы обладают одним очень важным недостатком, который заключается в наличии контакта измерительных электродов с исследуемой средой, что приводит их к износу. В то же время электроды акустических устройств, при помощи которых возбуждают соответствующие рабочие акустические волны, не контактируют со средами [90]. Это позволяет исследовать, например, агрессивные жидкости или газы. Также следует отметить, что при измерении параметров жидкостей емкостными ячейками у поверхности электродов возникает двойной электрический слой, что ограничивает время исследования.

В акустоэлектронике реализация данных устройств возможна, например, с помощью размещения нескольких линий задержек с различными периодами ВШП, которые возбуждают большой набор акустических волн в разных кристаллографических направлениях анизотропного кристалла [91, 92].

Одно из применений устройств «электронный нос и язык» это идентификация и классификация жидких веществ, когда требуется отличить одну жидкость от другой или сравнить ее с эталонной жидкостью. В работе [93] был применен трехканальный акустоэлектронный датчик для идентификации жидкостей по отдельным физическим параметрам. Для этого были изготовлены три однотипных трехканальных образца и затем

объединены в единую сенсорную систему. Авторами были идентифицированы 13 сортов вихси. Аналогично, в работах [94, 95] экспериментально измеренная совокупность жидкостных параметров была использована для идентификации различных жидких веществ.

Многие акустические и химические датчики для газов [96] и жидкостей [97], покрывают тонкими пленками, которые изменяют свои свойства под воздействием исследуемой среды. В качестве покрытий для газовых сенсоров используются различные оксиды металлов [98], полимерные и графеноподобные композиционные материалы [99, 100], а также пленки, изготовленные из мицелля грибов [101] и др.

Основным принципом, лежащим в основе выбора этих покрытий, является их способность избирательно реагировать на определенные химические вещества. При разработке жидкостных сенсоров используются специальные пленки, которые избирательно реагируют с определенным химическим или биологическим агентом в жидкости [102, 103].

В работе [104] использовали устройство «электронный нос» для оценки качества пищевого этанола. Устройство состояло из массива 8 пьезоэлементов на основе кварцевых резонаторов ОАВ-типа (генерация объёмных акустических волн) с базовой частотой колебаний 10.0 МГц с различными пленочными сорбентами на электродах. Объём измерительной пробы составлял 10 000 мкл, что, примерно, в 10 раз больше объёма проб, которые используются в акустоэлектронных устройствах на основе ПАВ или АВП. Ключевым недостатком данного метода является использование кварцевых резонаторов, так как они ограничены по частоте и чувствительны к механическим нагрузкам и температурным изменениям, что негативно влияет на стабильность частоты.

Исследование идентификации марок авиационных масел проводили в работе [105]. Авторы использовали метод пьезокварцевого микровзвешивания. Для этого на 3 тонкие кварцевые пластины с постоянной собственной частотой колебаний нанесли тонкие пленки сорбентов:

полиэтиленгликолем 2000 (ПЭГ - 2000), родамином - 6Ж (Р6Ж) и полидиметилсилоксаном (ПДМС). Недостатком данного метода является то, что сорбенты каждой пластины должны отличаться по сорбционному сродству к индивидуальным молекулам газа или группе родственных соединений. Также при регулярных измерениях происходит износ пленок-сорбентов, которые необходимо обновлять. И надо понимать, что чем сложнее система, тем она дороже и тем менее надежны ее эксплуатационные характеристики. При выходе из строя одного сенсора необходима его замена и перенастройка всей системы.

Несмотря на то, что существует большое количество устройств для идентификации жидкостей, работающих как на одном, так и на различных комбинациях методов, разработка новых устройств по-прежнему является актуальной задачей. Также стоит обратить внимание на актуальность исследований жидкостей при различных температурах.

Как известно, при температуре ниже нуля вода переходит из жидкого состояния в твердое состояние. Этот процесс является обратимым и при температурах выше нуля лед снова превращается в воду. Данный процесс является фазовым переходом первого рода [106]. В последние годы в связи с изменением климата исследование этого процесса является все более и более актуальным [107 - 112]. Исследование влияния понижения температуры воды на ее структуру, а также на структуру образующегося льда активно проводилось теоретически при помощи методов молекулярной динамики [113, 114], функции Гиббса [115], и из первых принципов [116, 117]. Следует отметить, что вопрос контроля таких переходов важен не только с фундаментальной, но и с практической точки зрения. Образование льда является опасным процессом при эксплуатации автомобильных дорог, самолетов, кораблей и т.д. [30]. Его образование может приводить к некорректному функционированию ветряных электрических турбин [118, 119]. Важным аспектом является контроль процесса замерзания пищевых продуктов или биологических тканей [114, 120]. К настоящему времени

датчики оледенения разработаны на основе нескольких физических принципов. К ним относятся оптические [121], емкостные [122], электро-оптический [123], волоконно-оптический [124], радиочастотный [125] и акустический [118, 126 - 128] методы.

В акустических методах контроля фазового перехода вода – лёд используют различные типы волн, например ультразвук для измерения толщины льда [126], ПАВ [127, 128] и СН ПАВ [129 - 135] для исследования процесса замерзания. В основном в исследованиях используют одну акустическую волну. Однако мало где используют АВП, которые существуют в одном акустическом устройстве в большом количестве. Использование нескольких типов волн позволит получить больше полезной информации о процессе обледенения.

В работе [128] для исследования фазового перехода вода – лёд используют АВП в различных пьезоэлектрических материалах (кварц, ниобат лития, танталат лития), срезах и двух направлениях распространения (X и $X + 90^\circ$). Авторами показано, что наибольшая чувствительность волн наблюдается в пластине кварца при образовании льда на поверхности пьезоэлектрической пластины. Это связано с чувствительностью волн к механическим свойствам льда.

Также исследование фазового перехода «жидкость – твердое тело» с помощью АВП показано в работе [135]. В качестве подложек использовали монокристаллическую ($YZ - LiNbO_3$) и слоистую структуру (ZnO/Si). Экспериментальные исследования проводились для различных расположений тестируемой жидкости: 1) жидкость расположена на ВПП и на пути распространения волн; 2) только на пути распространения волн; 3) только на ВПП. Показано, что для корректности измерений требуется расположение жидкости вне зоны электромеханических преобразователей для исключения её воздействия на их работу.

Однако дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования акустических волн, распространяющихся в более анизотропных срезах

пластин ниобата и танталата лития, позволят увеличить количество используемых для анализа мод и увеличить объем информации, получаемой с одного устройства.

Используют и другие методы исследования фазового перехода. В работе [136] авторы использовали коаксиальный зонд векторного анализатора цепей Agilent Microwave Network Analyzer N5242A PNA-X. Было исследовано изменение диэлектрической проницаемости воды вблизи точки фазового перехода (0°C). С помощью метода Рамановской спектроскопией исследовано переход жидкость – кристалл раствора KNO_3 [137]. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование вода – лед в магнитном поле [138].

При анализе распространения акустических волн в пьезоэлектрических пластинах, находящихся в контакте с жидкостью нельзя обойти вопрос радиационных потерь, которые являются одной из причин затухания волн. Они обусловлены вязкоупругими потерями, акустоэлектронным взаимодействием и излучением акустических волн в жидкость из-за разницы скоростей распространения акустической волны в пластине V_ϕ и продольной объемной акустической волны в жидкости $V_{ж}$ ($V_\phi > V_{ж}$) [16, 139 - 141].

Долгое время считалось, что высокоскоростные волны Лэмба, имеющие большие значения V_ϕ и нормальной компоненты смещения, перпендикулярной плоскости пластины (U_3), должны поглощаться жидкостью полностью, как это происходит с поверхностными акустическими волнами (ПАВ) [142]. Однако, в работе [143] было показано, что такие волны все же существуют, а их аналогия с ПАВ не совсем корректна. Это связано с тем, что механические смещения, сопровождающие волны Лэмба, распределены по всей толщине пластины в несколько сотен микрон, а в случае ПАВ эти смещения сконцентрированы в тонком приповерхностном слое подложки толщиной порядка нескольких микрон.

Зависимость радиационных потерь от соотношения скоростей акустических волн в пластине V_ϕ и жидкости $V_{ж}$ подробно изучена в работе [140]. На примере антисимметричной волны Лэмба нулевого порядка

показано, что при $V_{\phi} < V_{жс}$ затухание волны, связанное с излучением в жидкость, отсутствует, при $V_{\phi} = V_{жс}$ оно возникает и при $V_{\phi} > V_{жс}$ вначале растёт, а затем монотонно снижается. При этом влияние поляризации волны на величину радиационного поглощения не рассматривалось.

Недавно появились работы, в которых обнаружены и исследованы акустические волны в пьезоэлектрических пластинах с практически нулевой компонентной U_3 , [144, 145], либо волны с эллиптической поляризацией, причем эллипс лежит в плоскости пластины [45, 128, 146]. Очевидно, что данные волны могут эффективно использоваться для создания датчиков жидкости. Однако подробного исследования зависимости радиационных потерь этих волн от их поляризации и скорости не проводилось.

Таким образом, проведенный обзор показал, что исследование влияния анизотропии пьезоэлектрических материалов на эффект взаимодействия акустических волн различных типов с нагрузкой, находящейся на поверхности пьезоэлектрика, в том числе при различных температурах, носит ограниченный характер и многие закономерности еще не выявлены. Также представляет интерес проведение исследований, касающихся уточнения физических механизмов, приводящих к радиационным потерям энергии акустической волны при ее распространении в пластинах, граничащих с жидкими средами. В связи с этим была сформулирована следующая цель данной диссертационной работы.

Целью данной 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.

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 $Y, X+30^\circ \text{LiNbO}_3$ переход из воды в лед приводит к полному поглощению всех акустических волн в рассматриваемом диапазоне частот, за исключением одной волны на частоте $f = 36.8 \text{ МГц}$.

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 слабвязких водных растворов, соответствующих пяти базовым «вкусам». Также данным методом были идентифицированы аэробные бактерии разных типов в питательной среде Лурье-Бертрана, 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.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Ориентационные гистограммы изменения вносимых потерь $\Delta S_{12} = |S_{12}^{\text{ж-т}}| - |S_{12}^{H_2O}|$ для акустических волн различных типов в сильно анизотропных пьезоэлектрических пластинах, находящихся в контакте со слабвязкими жидкостями (раствор NaCl, раствор $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, раствор $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, раствор $\text{C}_5\text{H}_8\text{NO}_4\text{Na}$, 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 $\Delta S_{12} = |S_{12}^{\text{лед}}| - |S_{12}^{H_2O}| = 2.3$ 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).

Достоверность

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).

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.

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. – DOI: 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

Работа выполнена в рамках проектов МОН № 075-15-2023-580, РФФ № 20-19-00708П, ГЗ 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.

Структура и объем диссертации

Диссертация включает в себя введение, четыре главы и заключение. Полный объем работы составляет 118 страниц, 19 рисунков и 26 таблиц. Список литературы состоит из 170 ссылок.

Во **введении** описана актуальность тематики, представлен аналитический обзор основной литературы по существующим методам анализа свойств различных жидкостей и фазовых переходов жидкость - лед, в том числе с использованием акустических методов. На основании проведенного обзора литературы представлена степень разработанности темы исследования. Также описаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту и степень апробации полученных результатов.

В **первой главе** теоретически и экспериментально исследованы акустические волны различных типов в структуре «слабовязкая, проводящая жидкость – пьезоэлектрическая пластина – вакуум». В качестве растворов использовались слабовязкие водные растворы хлорида натрия (NaCl), глюкозы ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), лимонной кислоты ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) и глутамата натрия ($\text{C}_5\text{H}_8\text{NO}_4\text{Na}$), а также экстракты полыни, каждый из которых был поставлен в соответствие одному из пяти базовых «вкусов» (соленый, сладкий, кислый, умами и горький). Было теоретически исследовано влияние анизотропии пьезоэлектрической пластины 128°Y ниобата лития на взаимодействие указанных жидкостей с акустическими волнами различных типов. Описана методика создания многопараметрического многомодового акустоэлектронного устройства. Экспериментально получены зависимости

изменения вносимых потерь различных акустических волн в рассмотренных структурах от направления их распространения и построены ориентационные гистограммы для каждой слабовязкой жидкости, соответствующей одному из «вкусов». Показана возможность создания акустического «портрета» рассмотренных жидкостей.

Во **второй главе** теоретически и экспериментально исследованы акустические волны различных типов в структуре «вода/лед – пьезоэлектрическая пластина – воздух». Теоретически исследовано влияние анизотропии пьезоэлектрических пластин 128°Y ниобата лития, Y ниобата лития и 36°Y танталата лития на взаимодействие акустических волн различных типов с расположенными на поверхности пластины водой и льдом, возникающим в процессе фазового перехода. Экспериментально получены зависимости изменения вносимых потерь различных акустических волн при фазовом переходе вода-лед от направления их распространения и материала пьезоэлектрической пластины.

В **третьей главе** экспериментально исследовано влияние анизотропии пьезоэлектрической пластины 128°Y ниобата лития на взаимодействие акустических волн различных типов с находящимися на поверхности пластины суспензиями, такими как биологические суспензии на основе бактерий *Rhodococcus sp.* и *Methylophilus sp.* и питательного раствора Лурье-Бертрана, а также с вязкие суспензии на основе силиконового масла и нано- и микрочастиц Fe и Fe_3O_4 . Построены соответствующие ориентационные гистограммы и показано, что разработанный метод на основе многопараметрического многомодового акустоэлектронного устройства может быть использован для анализа, как биологических суспензий, так и вязких суспензий на основе неорганических веществ.

В **четвертой главе** экспериментально исследовано влияние дистиллированной воды на радиационные потери акустических волн Лэмба высших порядков в различных пьезоэлектрических пластинах. Рассмотрены волны, у которых фазовая скорость V_ϕ в пластине больше, чем скорость

продольной объемной акустической волны в жидкости $V_{ж}$. Проанализировано влияние поляризации рассматриваемых волн на их затухание. Построены ориентационные зависимости радиационных потерь, которые позволили сделать вывод о том, что доминирующей при формировании радиационных потерь является величина нормальной к поверхности пластины компоненты механического смещения U_3 . Для малых значений U_3 излучение волн Лэмба в жидкость и величина радиационных потерь малы даже при $V_{ф} \gg V_{ж}$, а для больших значений U_3 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).

В **Заключении** приведены основные выводы и результаты диссертационной работы.

Глава 1. Исследование влияния анизотропии пьезоэлектрических пластин на взаимодействие акустических волн различных типов с жидкостями, расположенными на поверхности пластины

Вкус это одно из наименее изученных человеческих чувств [147]. То, насколько вкусовые ощущения человека соответствуют химическому составу вещества, сильно варьируется от человека к человеку и во многом зависит от того, как мозг обрабатывает информацию. Можно выделить пять базовых вкусов, таких как сладкий, соленый, горький, кислый и умами. Каждому из этих вкусов можно поставить в соответствие определенное химическое вещество: глюкоза, соль, полынь, лимонная кислота и глутамат натрия. Водные растворы этих веществ обычно используются в качестве модельных объектов при разработке «электронных языков».

В данной главе предполагается, что вкус может определяться набором физических параметров водных растворов соответствующих веществ. Таким образом, была предпринята попытка по индивидуальным откликам акустических волн в пьезоэлектрической пластине, находящейся в контакте с анализируемой жидкостью, идентифицировать различные вкусы (сладкий, соленый, кислый, горький и умами).

1.1 Распространение акустических волн различных типов в структуре «пьезоэлектрическая пластина - слабовязкая жидкость»

В качестве жидкостей в данном исследовании использовались слабовязкие водные растворы хлорида натрия (NaCl), глюкозы ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), лимонной кислоты ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) и глутамата натрия ($\text{C}_5\text{H}_8\text{NO}_4\text{Na}$), а также экстракты полыни в концентрациях 0.02% и 0.9%. Как уже говорилось, эти вещества отвечают за пять основных вкусов: соленый, сладкий, кислый, умами и горький. Материальные константы для водных растворов хлорида натрия (NaCl), глюкозы ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), лимонной кислоты ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) и глутамата натрия ($\text{C}_5\text{H}_8\text{NO}_4\text{Na}$), которые использовались при расчетах, приведены в

таблице 1.1. Параметры водного раствора полыни были измерены следующим способом. Плотность ($\rho^{\text{ж-стб}}$) была измерена с помощью лабораторных аналитических весов CAS CAUW-220D (CAS Corp., Сеул, Южная Корея) и известного объема жидкости. Вязкость ($\eta_{44}^{\text{ж-стб}}$) определяли с помощью селективного акустического датчика [45]. Электропроводность ($\sigma_v^{\text{ж-стб}}$) и диэлектрическая проницаемость ($\epsilon^{\text{ж-стб}}/\epsilon_0$) были измерены на частоте 1 МГц с использованием электрофизического метода [148]. Модуль упругости ($C_{11}^{\text{ж-стб}}$) измеряли в соответствии с методом, описанным в [22].

Таблица 1.1. Физические параметры 0.9% водных растворов пяти исследуемых базовых вкусов.

| Физический параметр | Хлорид натрия (NaCl) | Глюкоза ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) | Лимонная кислота ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) | Экстракт полыни | Глутамат натрия ($\text{C}_5\text{H}_8\text{NO}_4\text{Na}$) |
|--|----------------------|---|---|-------------------|--|
| $\rho^{\text{ж-стб}}$, г/м ³ | 1.034 [149] | 1.002 [149] | 1.0002 [149] | 0.999 ± 0.001 | 0.998 [150] |
| $\eta^{\text{ж-стб}}$, мПа*сек | 1.085 [149] | 1.021 [149] | 1.02 [149] | 1.01 ± 0.01 | 1 [151] |
| $\sigma^{\text{ж-стб}}$, См/м | 1.4 [152] | $2 \cdot 10^{-4}$ [152] | 0.25 [152] | 0 | 10^{-3} [153] |
| $\epsilon^{\text{ж-стб}}/\epsilon_0$ | 77 [154] | 79.99 [155] | 63.6 [156] | 37 ± 2 | 90 [157] |
| $C_{11}^{\text{ж-стб}}$, 10^9 Па | 2.25 ± 0.05 | 2.25 ± 0.05 | 2.25 ± 0.05 | 2.25 ± 0.05 | 2.25 ± 0.05 [150] |

Поскольку жидкости имеют плотности, вязкости близкие по значениям к дистиллированной воде, и отличаются в основном по электрическим параметрам, то для теоретического анализа была выбрана структура «пьезоэлектрическая пластина — вязкая и проводящая жидкость» (рисунок 1.1).

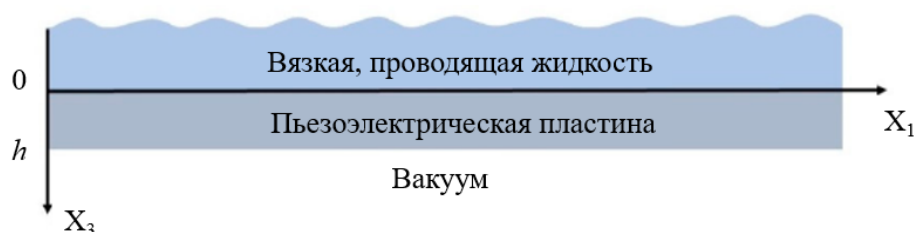


Рисунок 1.1. Геометрическая модель структуры «пьезоэлектрическая пластина — вязкая, проводящая жидкость».

Волна распространялась в направлении X_1 . Пьезоэлектрическая пластина ограничена плоскостями $X_3 = 0$ и $X_3 = h$. Область с $X_3 > h$ соответствует вакууму, а область с $X_3 < 0$ соответствует проводящей вязкой жидкости. Задача рассматривается как двумерная, поэтому предполагается, что все компоненты поля постоянны в направлении X_2 [139].

Чтобы найти фазовую скорость, затухание и механические перемещения волны, необходимо написать систему уравнений для каждой среды. Для пьезоэлектрической пластины уравнения движения, уравнение Лапласа и определяющие уравнения записываются следующим образом [139]:

$$\rho^{pz} \partial^2 U_i^{pz} / \partial t^2 = \partial T_{ij}^{pz} / \partial x_j, \partial D_j^{pz} / \partial x_j = 0, \quad (1.1)$$

$$T_{ij}^{pz} = C_{ijkl}^{pz} \partial U_l^{pz} / \partial x_k + e_{kij}^{pz} \partial \Phi^{pz} / \partial x_k, \quad (1.2)$$

$$D_j^{pz} = -\varepsilon_{jk}^{pz} \partial \Phi^{pz} / \partial x_k + e_{jlk}^{pz} \partial U_l^{pz} / \partial x_k, \quad (1.3)$$

Для вязких и проводящих жидкостей использовали уравнение движения, уравнение Пуассона, уравнение неразрывности заряда и определяющее уравнение [158]:

$$\rho^{ж-сть} \partial^2 U_i^{ж-сть} / \partial t^2 = \partial T_{ij}^{ж-сть} / \partial x_j, \partial D_j^{ж-сть} / \partial x_j = -\delta_v^{ж-сть} \quad (1.4)$$

$$\partial J_j^{ж-сть} / \partial x_j + \partial \delta_v^{ж-сть} / \partial t = 0 \quad (1.5)$$

$$T_{ij}^{ж-сть} = C_{ijkl}^{ж-сть} \partial U_l^{ж-сть} / \partial x_k, \quad (1.6)$$

$$D_j^{ж-сть} = -\varepsilon_{jk}^{ж-сть} \partial \Phi^{ж-сть} / \partial x_k, \quad (1.7)$$

$$J_j^{ж-сть} = -\sigma_v^{ж-сть} \partial \Phi^{ж-сть} / \partial x_j + d_v^{ж-сть} \partial \sigma_v^{ж-сть} / \partial x_j \quad (1.8)$$

Здесь U_i , t , T_{ij} , x_j , D_j , Φ и ρ являются компонентами механического перемещения частиц, времени, компонентами механического напряжения, координат, компонентами электрического перемещения, электрического потенциала и плотности соответственно. C_{ijkl} , e_{ikl} и ε_{jk} это упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические постоянные соответственно. $\delta_v^{ж-сть}$, $J_j^{ж-сть}$, и $\sigma_v^{ж-сть}$ - объемная плотность заряда, составляющие плотности тока и объемная проводимость жидкости соответственно. Индексы «pz» и «ж-сть»

указывают на то, что соответствующая переменная относится к пьезоэлектрической пластине и вязкой проводящей жидкости соответственно.

В областях вакуума $X_3 > h$ электрическое смещение удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\partial D_j^{\text{вак}} / \partial x_j = 0, \quad (1.9)$$

где $D_j^{\text{вак}} = -\varepsilon_0 \partial \Phi^{\text{вак}} / \partial x_k$. Здесь ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, а индекс «вак» указывает, что переменная относится к вакууму.

Затем соответствующие электрические и механические условия на каждой границе структуры записываются в виде [158, 159]:

$$x_3 = 0:$$

$$U_i^{pz} = U_i^{\text{ж-сть}}; T_{i3}^{pz} = T_{i3}^{\text{ж-сть}}; \Phi^{pz} = \Phi^{\text{ж-сть}}; D_3^{pz} = D_3^{\text{ж-сть}}; J_3^{\text{ж-сть}} = 0, \quad (1.10)$$

$$x_3 = h: T_{i3}^{pz} = 0; \Phi^{pz} = \Phi^{\text{вак}}; D_3^{pz} = D_3^{\text{вак}}. \quad (1.11)$$

Здесь $i = 1 - 3$. Из-за вязкости рассматриваемой жидкости ненулевые составляющие симметричных комплексных упругих постоянных $C_{11}^{\text{ж-сть}*}$ в матричной форме будут иметь следующий вид [158, 159]:

$$\begin{aligned} C_{11}^{\text{ж-сть}*} &= C_{22}^{\text{ж-сть}*} = C_{33}^{\text{ж-сть}*} = C_{11}^{\text{ж-сть}} + j\omega\eta_{11}^{\text{ж-сть}} \\ C_{12}^{\text{ж-сть}*} &= C_{13}^{\text{ж-сть}*} = C_{23}^{\text{ж-сть}*} = C_{11}^{\text{ж-сть}} + j\omega\eta_{12}^{\text{ж-сть}}, \\ C_{44}^{\text{ж-сть}*} &= C_{55}^{\text{ж-сть}*} = C_{66}^{\text{ж-сть}*} = j\omega\eta_{44}^{\text{ж-сть}} \end{aligned} \quad (1.12)$$

где вязкость жидкости учитывается как мнимая часть $j\omega\eta_{11}^{\text{ж-сть}}$ модулей упругости, где j - мнимая величина, $\omega = 2\pi f$ - угловая частота, $\eta_{11}^{\text{ж-сть}}$ - коэффициенты вязкости в Па·с, и $\eta_{12}^{\text{ж-сть}} = \eta_{11}^{\text{ж-сть}} - 2\eta_{44}^{\text{ж-сть}}$.

Для решения задачи использовали метод, описанный в [139]. Решение представлялось в виде совокупности плоских неоднородных волн

$$Y_j(x_1, x_3, t) = Y_j(x_3)e^{i\omega(t-x_1/V_n)}, \quad (1.13)$$

где $i = 1 \dots 8$ для пьезоэлектрика и жидкости, а для воздуха $i = 1, 2$; v - фазовая скорость; ω - круговая частота акустической волны.

Подставляя выражение (1.13) в уравнения (1.1) – (1.9), получается две системы из 8-ми и одну систему из 2-ух обыкновенных дифференциальных

линейных уравнений для пьезоэлектрической среды, жидкости и вакуума. Каждую из этих сред можно записать в следующем матричном виде:

$$[A][dY/dx_3] = [B][Y]. \quad (1.14)$$

Здесь $[dY/dx_3]$ и $[Y]$ – 8-мерные векторы для среды и жидкости и 2-мерные векторы для вакуума. Матрица $[A]$ и $[B]$ – квадратные, размером 8 x 8 для пьезоэлектрической среды и жидкости, и размером 2 x 2 для вакуума.

Поскольку матрица $[A]$ не является особенной ($\det[A] \neq 0$), то для каждой контактирующей среды можно записать

$$[dY/dx_3] = [A^{-1}][B][Y] = [C][Y]. \quad (1.15)$$

Далее для решения системы уравнений (1.15) необходимо найти собственные значения $\zeta^{(i)}$ матриц $[C]$ и соответствующие им собственные вектора $[Y^{(i)}]$, определяющие параметры парциальных волн, для каждой контактирующей среды. Общее решение будет линейной комбинацией всех парциальных волн для каждой среды:

$$Y_k = \sum_{i=1}^N A_i Y_k^{(i)} e^{\zeta_j^{(i)} x_3} e^{i\omega(t-x_1/V)}, \quad (1.16)$$

где число собственных значений $N = 8$ для пьезоэлектрической среды и жидкости, и $N = 2$ для вакуума; A_i - неизвестные величины.

Для нахождения величин A_i и скорости V воспользуемся механическими и электрическими граничными условиями (1.11). Как известно, в случае пьезоэлектрической пластины в рассмотрение принимаются все 8 собственных значений соответствующей матрице $[C]$. Для вакуума, расположенного в области $x_3 > h$, собственные значения соответствующей матрице $[C]$ с отрицательной действительной частью исключим из рассмотрения, поскольку все переменные в вакууме должны иметь убывающую амплитуду при удалении от пластины. Для жидкости, расположенной в области $x_3 < 0$, собственные значения матрицы $[C]$, соответсвтуют электрическим переменным с положительной действительной частью также исключим из рассмотрения. В таблице 1.2 представлена матрица граничных условий для решаемой задачи. В результате применения

Таблица 1.2. Матрица граничных условий для акустической задачи на рисунке 1.1

| Вязкая, проводящая жидкость | | | | | | | | | | | | | Пьезоэлектрическая пластина | | | | | | | | Вакуум |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--------|
| | $-U_1^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $-U_1^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | 0 | 0 | $U_1^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $U_1^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $U_1^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $U_1^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $U_1^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $U_1^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $U_1^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $U_1^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | | | | | | | | |
| $-U_2^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $-U_2^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $-U_2^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | 0 | 0 | $U_2^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $U_2^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $U_2^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $U_2^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $U_2^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $U_2^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $U_2^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $U_2^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | | | | | | | | |
| $-U_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $-U_3^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $-U_3^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | 0 | 0 | $U_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $U_3^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $U_3^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $U_3^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $U_3^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $U_3^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $U_3^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $U_3^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | | | | | | | | |
| $-T_{13}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $-T_{13}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $-T_{13}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | 0 | 0 | $T_{13}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{13}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{13}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{13}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{13}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{13}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{13}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{13}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | | | | | | | | |
| $-T_{23}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $-T_{23}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $-T_{23}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | 0 | 0 | $T_{23}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{23}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{23}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{23}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{23}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{23}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{23}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{23}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | | | | | | | | |
| $-T_{33}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $-T_{33}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $-T_{33}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | 0 | 0 | $T_{33}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{33}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{33}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{33}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{33}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{33}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{33}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{33}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | $-\Phi^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $-\Phi^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $\Phi^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $\Phi^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $\Phi^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $\Phi^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $\Phi^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $\Phi^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $\Phi^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $\Phi^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | $-D_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $-D_3^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $D_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $D_3^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $D_3^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $D_3^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $D_3^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $D_3^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $D_3^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $D_3^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | $-j_3^{(1)}$ | $-j_3^{(2)}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | |
| X ₃ = 0 | | | | | | | | | | | | | X ₃ = h | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $T_{13}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{13}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{13}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{13}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{13}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{13}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{13}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{13}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $T_{23}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{23}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{23}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{23}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{23}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{23}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{23}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{23}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $T_{33}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{33}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{33}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{33}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{33}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{33}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{33}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{33}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $\Phi^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $\Phi^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $\Phi^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $\Phi^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $\Phi^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $\Phi^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $\Phi^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $\Phi^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | $-\Phi^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $D_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $D_3^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $D_3^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $D_3^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $D_3^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $D_3^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $D_3^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $D_3^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | $-D_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | | | | | | | | |

описанного метода определялись фазовая скорость волны и амплитуда всех электрических и механических переменных в зависимости от координаты X_3 .

Значения фазовой скорости волны (V_ϕ) и трех компонент механического смещения (U_1, U_2, U_3) в плоскости $X_3 = 0$ были определены с помощью процедуры итерационного поиска, основанного на обнулении определителя матрицы, представляющей соответствующие граничные условия [140]. Материальные константы для LiNbO_3 были взяты из работы [160] и представлены в таблице 1.3

Таблица 1.3. Плотность ρ (кг/м^3), упругие константы C_{ij} (ГПа), пьезоэлектрические коэффициенты e_{ij} (С/м^2) и диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{ij}/\varepsilon_0$ LiNbO_3 , использованные в расчетах.

| LiNbO_3 ($\rho=4650$) | | | | | | | |
|----------------------------------|------------|------------|------------|----------------------------------|----------------------------------|------------|------------|
| C_{11}^E | C_{12}^E | C_{13}^E | C_{33}^E | C_{14}^E | C_{33}^E | C_{44}^E | C_{66}^E |
| 203 | 57.3 | 75.2 | 395 | 8.5104 | 242.4 | 59.5 | 72.8 |
| e_{15} | e_{16} | e_{31} | e_{33} | $\varepsilon_{11}/\varepsilon_0$ | $\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$ | | |
| 3.84 | -2.37 | 0.23 | 1.3 | 44.305 | 27.9 | | |

Кроме того, был рассчитан коэффициент электромеханической связи для акустических волн в диапазоне частот 33-50 МГц. Этот диапазон соответствует возбуждению акустических мод с длиной волны 200 мкм при $h/\lambda = 2.5$. Для расчета коэффициентов электромеханической связи (k^2 , %) использовалась формула (1.15) [16]

$$k^2 = 200 (v_0 - v_m)/v_0, \quad (1.17)$$

где v_0 и v_m - скорости акустических волн для электрически открытой пластины и электрически замкнутой пластины с одной стороны соответственно.

Затухание по мощности в дБ/λ рассчитывалось по следующей формуле [161]:

$$\Gamma^{th} = \frac{4\pi \text{Im}(V_{ph})}{0.23 \text{Re}(V_{ph})} \quad (1.18)$$

В таблицах 1.4 - 1.8 представлены результаты теоретического анализа для акустических волн в структуре «пластина $128^\circ\text{Y} + \Theta \text{LiNbO}_3 - 0.9\%$ водный раствор тестируемой жидкости». Следует отметить, что присутствие на поверхности вязкой и проводящей жидкости с различными физическими характеристиками может привести к изменению типа акустической волны, выбранной в эксперименте для построения гистограммы вкуса, и сдвигу соответствующей рабочей частоты волны. Изменения рабочих частот волн находятся в пределах 0.5 - 1 МГц. В связи с этим в таблицах 1.4 - 1.8 приведены параметры, рассчитанные для волн, выбранных в ходе эксперимента для создания диаграмм вкуса.

Таблица 1.4. Коэффициент электромеханической связи (k^2 , %), затухание (Γ , дБ/λ) и компоненты механического смещения (U_1, U_2, U_3) для акустических волн в структуре «пластина $128^\circ\text{Y LiNbO}_3 - 0.9\%$ водный раствор NaCl»

| f , МГц | ~34 | ~37 | ~41 | ~44 | ~48 |
|-------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| $\Theta=0^\circ$ | | | | | |
| k^2 , % | 0.03 | 1.65 | 0.42 | 3.25 | 1.98 |
| Γ , дБ/λ | 0.0012 | 0.0097 | 0.0045 | 0.0031 | 0.044 |
| U_1, U_2, U_3 | 1; 32; 3 | 1; 0.03; 0.4 | 1; 2.5; 0.7 | 1; 0.05; 0.1 | 1; 0.3; 3.4 |
| $\Theta=30^\circ$ | | | | | |
| k^2 , % | 0.09 | 1.73 | 0.82 | 0.04 | 1.65 |
| Γ , дБ/λ | 0.0006 | 0.0078 | 0.0012 | 0.0019 | 0.042 |
| U_1, U_2, U_3 | 1; 2; 0.04 | 1; 0.5; 0.3 | 1; 1.7; 0.1 | 1; 2; 0.4 | 1; 0.3; 3.2 |
| $\Theta=60^\circ$ | | | | | |
| k^2 , % | 1.48 | 0.9 | 0.9 | 0.3 | 1.0 |
| Γ , дБ/λ | 0.003 | 0.038 | 0.0023 | 0.0032 | 0.04 |
| U_1, U_2, U_3 | 1; 0.6; 0.2 | 1; 4.5; 6.4 | 1; 5.7; 0.9 | 1; 1.3; 0.4 | 1; 0.6; 3.2 |
| $\Theta=90^\circ$ | | | | | |
| k^2 , % | 0.4 | 1.1 | 0.4 | 0.02 | 1.2 |
| Γ , дБ/λ | 0.0023 | 0.045 | 0.0023 | 0.0057 | 0.045 |

| | | | | | |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| U_1, U_2, U_3 | 1; 0; 0.2 | 1; 0; 1.8 | 1; 0; 0.2 | 1; 0; 0.4 | 1; 0; 6.5 |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|

Таблица 1.5. Коэффициент электромеханической связи (k^2 , %), затухание (Γ , дБ/λ) и компоненты механического смещения (U_1, U_2, U_3) для акустических волн в структуре «пластина 128°Y LiNbO₃ – 0.9% водный раствор глюкозы»

| | | | | | |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| f , МГц | ~34 | ~37 | ~41 | ~44 | ~48 |
| $\Theta=0^\circ$ | | | | | |
| k^2 , % | 0.03 | 2.24 | 0.42 | 3.25 | 1.98 |
| Γ , дБ/λ | 0.001 | 0.046 | 0.003 | 0.0009 | 0.04 |
| U_1, U_2, U_3 | 1; 37; 3.8 | 1; 0.3; 2.9 | 1; 3.8; 0.9 | 1; 0.05; 0.1 | 1; 0.05; 0.3 |
| $\Theta=30^\circ$ | | | | | |
| k^2 , % | 0.09 | 1.95 | 0.82 | 0.04 | 1.65 |
| Γ , дБ/λ | 0.005 | 0.04 | 0.0006 | 0.002 | 0.04 |
| U_1, U_2, U_3 | 1; 2; 0.04 | 1; 2.8; 5.2 | 1; 1.7; 0.1 | 1; 1.9; 0.4 | 1; 0.3; 3.4 |
| $\Theta=60^\circ$ | | | | | |
| k^2 , % | 0.35 | 0.9 | 0.4 | 0.3 | 1. |
| Γ , дБ/λ | 0.0016 | 0.04 | 0.0013 | 0.0028 | 0.038 |
| U_1, U_2, U_3 | 1; 1.4; 0.2 | 1; 4.4; 6.3 | 1; 0.6; 0.2 | 1; 1.3; 0.4 | 1; 0.7; 3.2 |
| $\Theta=90^\circ$ | | | | | |
| k^2 , % | 0.4 | 0.04 | 0.4 | 0.02 | 1.2 |
| Γ , дБ/λ | 0.0027 | 0.0026 | 0.002 | 0.0057 | 0.043 |
| $\Theta=0^\circ$ | 1; 0; 0.2 | 1; 0; 0.2 | 1; 0; 0.2 | 1; 0; 0.4 | 1; 0; 6.7 |

Таблица 1.6. Коэффициент электромеханической связи (k^2 , %), затухание (Γ , дБ/λ) и компоненты механического смещения (U_1, U_2, U_3) для акустических волн в структуре «пластина 128°Y LiNbO₃ – 0.9% водный раствор лимонной кислоты»

| | | | | | |
|------------------|--------|-------|--------|-------|-------|
| f , МГц | ~34 | ~37 | ~41 | ~44 | ~48 |
| $\Theta=0^\circ$ | | | | | |
| k^2 , % | 0.03 | 1.65 | 0.42 | 3.25 | 1.98 |
| Γ , дБ/λ | 0.0012 | 0.017 | 0.0042 | 0.013 | 0.051 |

| | | | | | |
|-----------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| U_1, U_2, U_3 | 1; 34; 3.5 | 1; 0.03; 0.4 | 1; 3.4; 0.8 | 1; 0.05; 0.1 | 1; 0.3; 3.7 |
| $\Theta=30^\circ$ | | | | | |
| $k^2, \%$ | 0.09 | 1.73 | 0.82 | 3.1 | 1.65 |
| $\Gamma, \text{дБ}/\lambda$ | 0.0008 | 0.014 | 0.0013 | 0.015 | 0.046 |
| U_1, U_2, U_3 | 1; 2; 0.04 | 1; 0.5; 0.3 | 1; 1.7; 0.1 | 1; 0.5; 0.3 | 1; 0.3; 3.4 |
| $\Theta=60^\circ$ | | | | | |
| $k^2, \%$ | 1.48 | 0.9 | 0.4 | 0.3 | 1 |
| $\Gamma, \text{дБ}/\lambda$ | 0.0073 | 0.041 | 0.0025 | 0.0023 | 0.042 |
| U_1, U_2, U_3 | 1; 0.6; 0.2 | 1; 4.4; 6.3 | 1; 0.6; 0.2 | 1; 1.3; 0.4 | 1; 0.7; 3.3 |
| $\Theta=90^\circ$ | | | | | |
| $k^2, \%$ | 0.4 | 1.1 | 0.4 | 0.02 | 0.4 |
| $\Gamma, \text{дБ}/\lambda$ | 0.0011 | 0.049 | 0.0008 | 0.0058 | 0.003 |
| U_1, U_2, U_3 | 1; 0; 0.2 | 1; 0; 1.8 | 1; 0; 0.2 | 1; 0; 0.4 | 1; 0; 0.2 |

Таблица 1.7. Коэффициент электромеханической связи ($k^2, \%$), затухание ($\Gamma, \text{дБ}/\lambda$) и компоненты механического смещения (U_1, U_2, U_3) для акустических волн в структуре «пластина $128^\circ\text{Y LiNbO}_3$ – 0.9% водный раствор глутамата натрия»

| | | | | | |
|-----------------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| $f, \text{МГц}$ | ~34 | ~37 | ~41 | ~44 | ~48 |
| $\Theta=0^\circ$ | | | | | |
| $k^2, \%$ | 0.03 | 1.65 | 0.42 | 3.25 | 1.98 |
| $\Gamma, \text{дБ}/\lambda$ | 0.0012 | 0.0069 | 0.0032 | 0.001 | 0.04 |
| U_1, U_2, U_3 | 1; 36.6; 3.8 | 1; 0.03; 0.4 | 1; 3.7; 0.9 | 1; 0.05; 0.1 | 1; 0.4; 4 |
| $\Theta=30^\circ$ | | | | | |
| $k^2, \%$ | 0.09 | 1.73 | 0.82 | 3.1 | 1.65 |
| $\Gamma, \text{дБ}/\lambda$ | 0.0005 | 0.0053 | 0.0006 | 0.0035 | 0.039 |
| U_1, U_2, U_3 | 1; 2; 0.05 | 1; 0.5; 0.4 | 1; 1.7; 0.1 | 1; 0.5; 0.3 | 1; 0.3; 3.3 |
| $\Theta=60^\circ$ | | | | | |
| $k^2, \%$ | 1.48 | 0.9 | 0.9 | 0.3 | 1 |
| $\Gamma, \text{дБ}/\lambda$ | 0.0023 | 0.036 | 0.0016 | 0.0029 | 0.039 |

| | | | | | |
|-----------------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| U_1, U_2, U_3 | 1; 0.6; 0.2 | 1; 4.8; 6.7 | 1; 6.5; 1 | 1; 1.3; 0.4 | 1; 0.7; 3.2 |
| $\Theta=90^\circ$ | | | | | |
| $k^2, \%$ | 0.4 | 1.1 | 0.4 | 1.2 | 1.2 |
| $\Gamma, \text{дБ}/\lambda$ | 0.0027 | 0.042 | 0.0019 | 0.042 | 0.043 |
| U_1, U_2, U_3 | 1; 0; 0.2 | 1; 0; 1.8 | 1; 0; 0.2 | 1; 0; 3 | 1; 0; 6.8 |

Таблица 1.8. Коэффициент электромеханической связи ($k^2, \%$), затухание ($\Gamma, \text{дБ}/\lambda$) и компоненты механического смещения (U_1, U_2, U_3) для акустических волн в структуре «пластина $128^\circ\text{Y LiNbO}_3 - 0.9\%$ водный раствор полины»

| | | | | | |
|-----------------------------|------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| $f, \text{МГц}$ | ~34 | ~37 | ~41 | ~44 | ~48 |
| $\Theta=0^\circ$ | | | | | |
| $k^2, \%$ | 0.03 | 1.65 | 0.42 | 0.14 | 1.98 |
| $\Gamma, \text{дБ}/\lambda$ | 0.0011 | 0.0069 | 0.0028 | 0.0008 | 0.04 |
| U_1, U_2, U_3 | 1; 41; 4.1 | 1; 0.03; 0.4 | 1; 3.7; 0.9 | 1; 24; 2.1 | 1; 0.4; 4 |
| $\Theta=30^\circ$ | | | | | |
| $k^2, \%$ | 0.09 | 1.73 | 0.82 | 3.1 | 0.04 |
| $\Gamma, \text{дБ}/\lambda$ | 0.0005 | 0.0053 | 0.00068 | 0.0036 | 0.0018 |
| U_1, U_2, U_3 | 1; 2; 0.05 | 1; 0.5; 0.4 | 1; 1.7; 0.1 | 1; 0.5; 0.3 | 1; 1.9; 0.4 |
| $\Theta=60^\circ$ | | | | | |
| $k^2, \%$ | 0.8 | 0.9 | 0.4 | 0.3 | 1 |
| $\Gamma, \text{дБ}/\lambda$ | 0.047 | 0.036 | 0.0013 | 0.0028 | 0.038 |
| U_1, U_2, U_3 | 1; 1; 2.7 | 1; 4.8; 6.7 | 1; 0.7; 0.2 | 1; 1.4; 0.4 | 1; 0.7; 3.2 |
| $\Theta=90^\circ$ | | | | | |
| $k^2, \%$ | 0.4 | 1.1 | 0.4 | 0.02 | 0.4 |
| $\Gamma, \text{дБ}/\lambda$ | 0.0027 | 0.042 | 0.0019 | 0.0057 | 0.0022 |
| U_1, U_2, U_3 | 1; 0; 0.2 | 1; 0; 1.8 | 1; 0; 0.2 | 1; 0; 0.36 | 1; 0; 0.2 |

Анализ полученных теоретических результатов показал, что влияние различных жидкостей на различные акустические моды обусловлено как электрическими, так и механическими свойствами самих жидкостей и поляризацией соответствующих мод [1*].

Несмотря на то, что механические свойства использованных жидкостей близки между собой, затухание различных мод в их присутствии обусловлено не только различием их электрических параметров. Например, в таблице 1.4 при $\Theta = 0^0$ моды 1 ($f = 41$ МГц) и 2 ($f = 44$ МГц) с $k^2 = 0.42\%$ и 3.25% , соответственно, характеризуются близкими значениями затухания Γ в присутствии 0.9% раствора NaCl, хотя данная жидкость обладает проводимостью и ее присутствие должно приводить к значительному затуханию только моды 2.

Судя по всему, данный эффект связан с различной поляризацией используемых мод. Видно, что мода 1 является квазипоперечной, а мода 2 квазисимметричной модами высшего порядка. В связи с этим затухание за счет закорачивания тангенциальных компонент электрического поля волны усиливается за счет радиационных потерь из-за присутствия компонент механического смещения U_1 и U_3 .

В случае слабопроводящих жидкостей типа растворов глюкозы, полини или глутамата натрия важную роль играет различие их диэлектрических проницаемостей. Однако, коэффициент электромеханической связи используемых волн играет здесь гораздо меньшую роль, чем их механическая поляризация. В целом, следует отметить, что для дальнейшей разработки многопараметрического акустического датчика вкуса необходимо использовать более анизотропную пластину, например, X срез ниобата лития, и проводить более целенаправленный теоретический поиск мод, селективно реагирующих на механические и электрические параметры жидкости.

1.2 Разработка многопараметрического метода определения «вкуса» жидкостей на основе акустических волн различных типов в анизотропных пьезоэлектрических пластинах

Для экспериментального исследования влияния анизотропии на взаимодействие акустических волн в пластине с водными растворами, находящимися на ее поверхности, был разработан многомодовый

многопараметрический датчик жидкости. Основой этого датчика 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° , 30° , 60° , 90° к кристаллографической оси X. Углы были выбраны исходя из максимальной анизотропии данной кристаллографической ориентации [40, 162].

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/λ) = 2.5. На дисперсионных зависимостях скорости акустических волн от h/λ можно увидеть, что при значении 2.5 существует большое количество акустических волн разнообразных типов. Важно отметить, что чем больше становится h/λ , тем больше появляется волн с близкими скоростями. Поэтому 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 ячейка для жидкости из тефлона диаметром 20 мм, высотой 3 мм, толщиной стенок 1 мм и объёмом 764 мм^3 . Ячейка крепилась к поверхности пластины с помощью цианакрилатного клея. Расстояние от каждого ВШП до ячейки составляло 1 мм.

Создание набора линий задержки на поверхности пластины происходило следующим образом. Полированная поверхность пластины очищалась с помощью ацетона и аргоновой плазмы. Затем, при помощи магнетронного напыления (VSE-PVD-DESKPRO, Вакуумные технологии и оборудование, Новосибирск, Россия) в течение ~4 минут на нее наносили пленку алюминия толщиной 400 нм. Рабочее давление внутри камеры составляло 5.7×10^{-3} Торр, а мощность разряда составляла 200 Вт. В процессе распыления поверхность пластины подвергалась бомбардировке

высокоэнергетическими частицами, что приводило к ее нагреву. В связи с этим перед извлечением из камеры образец охлаждали аргоном в течение часа. После охлаждения образец крепился на настольную центрифугу Sawatec SM-180-BT (SAWATEC AG, Сентвиль, Швейцария) и на его поверхность равномерно наносилось 2 мл негативного фоторезиста SU-8 с помощью пипет-дозатора. При скорости вращения 3000 об/мин в течение ~ 1 минуты формировался слой фоторезиста толщиной 2 мкм. Далее пленку фоторезиста полимеризовали на термоплитке при температуре 94°C в течение 30 минут. Цифровой фотошаблон структуры ВШП был создан с помощью бесплатного программного обеспечения Layout 6.0. На установке безмасковой фотолитографии (Smart Print, Microlight 3D, Ла Тронш, Франция) происходило экспонирование образца длиной волны 385 нм. Время экспонирования варьировалось в зависимости от яркости объектива. Незасвеченные участки фоторезиста удаляли с помощью проявителя P-236 (ФРАСТ-М, Москва, Россия). Слой металла на незасвеченных участках протравливали, используя смесь ортофосфорной и азотной кислот в соотношении 95:5 в течение часа.

Для того, чтобы готовое акустоэлектронное устройство можно было использовать была изготовлена соответствующая оснастка. Модель оснастки создавалась в бесплатной браузерной программе по 3D моделированию TinkerCad. Оснастка печаталась на экструзионном принтере VolgoBot A4 PRO 3D. С помощью тонкого слайса индия (In) к контактной площадке ВШП были припаяны два медных провода. Другие концы проводов припаивались к разъёму CP-50-73 ПВ, к центральной жиле и к заземлению. Данный процесс был повторен для всех 8 ВШП.

На рисунке 1.2 представлены схема и фотография получившегося экспериментального образца [1*, 3*]. Благодаря симметрии выбранного среза волны, распространяющиеся под углами $\theta = 60^\circ$ и 120° , идентичны. В связи с этим формирование линии задержки при угле $\theta = 120^\circ$ не имело смысла. На рисунке 1.2б видно, что у акустоэлектронного устройства есть еще 2 ряда

ВШП (внешняя и центральная окружность) по 4 акустических канала в каждом, с ВШП $\lambda = 300$ и 500 мкм. В данных исследованиях эти линии задержки не использовались.

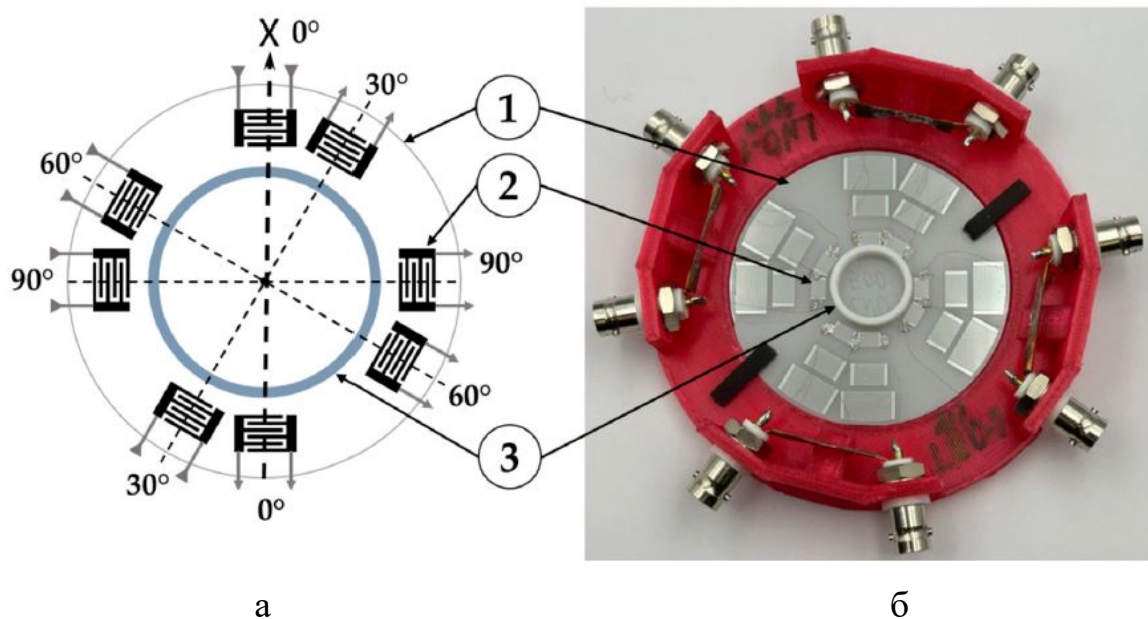


Рисунок 1.2. Схематический вид а) и б) фотография экспериментального образца с набором акустических линий задержки (каналов) на одной пьезоэлектрической пластине. Акустические каналы ориентированы под углами $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$, и 90° относительно кристаллографической оси X. 1 - пьезоэлектрическая пластина, 2 - ВШП, 3 - ячейка диаметром 18 мм.

В качестве аналитического акустического параметра были выбраны полные вносимые потери $(-S_{12}) = \alpha \times L$ (α – затухание волны, дБ, L – диаметр ячейки), возникающие при возбуждении, распространении и преобразовании акустических пластинчатых волн, так как данный параметр слабо зависит от температуры. Экспериментальный образец подключался с помощью фазостабильных кабелей к векторному анализатору цепей KEYSIGHT (Keysight, Santa Rosa, CA, USA) с точностью измерений ± 0.1 дБ. Измерения вносимых потерь S_{12} проводили в диапазоне частот 10...60 МГц при комнатной температуре $22 \pm 1^\circ\text{C}$ и нормальном атмосферном давлении 746 мм.рт.ст.

Акустическим откликом на изменение амплитуды акустических волн под действием свойств исследуемых жидкостей было выбрано изменение вносимых потерь (ВП) $\Delta S_{12} = |S_{12}^{\text{ж-тб}}| - |S_{12}^{H_2O}|$, так как это исключает вклад радиационных потерь ($R(U_3)$ - излучение волны в жидкость с поверхности пластины) и позволяет сравнивать исследуемые жидкости только на основе общего влияния их плотности, электропроводности, и диэлектрической проницаемости на соответствующую акустическую волны. В связи с этим первоначально была измерена частотная зависимость S_{12} в присутствии дистиллированной воды ($\eta = 1.03$ сПуаз, $\sigma < 1$ мСм/м).

Для проведения исследований были изготовлены водные растворы хлорида натрия (NaCl), глюкозы ($C_6H_{12}O_6$), лимонной кислоты ($C_6H_8O_7$), глутамата натрия ($C_5H_8NO_4Na$) 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.

При приготовлении водного раствора полыни 10 г сухой травы добавляли в стеклянную колбу с 200 мл дистиллированной воды. Раствор доводили до кипения и помещали на водяную баню на 15 минут. Затем охлаждали и процеживали, чтобы убрать частички травы. Наконец к 10 мл дистиллированной воды добавляли 2 мкм и 90 мкм получившегося раствора для получения водного раствора полыни 0.02% и 0.9% концентраций. Материальные постоянные для водных растворов хлорида натрия, глюкозы, лимонной кислоты и глутамата натрия приведены в таблице 1.1 п. 1.1.

В процессе эксперимента в кювету сначала наливался первый раствор, например, отвечающий за соленый вкус, и проводились измерения в каждом из 4 акустических каналов. Далее жидкость извлекалась шприцом, емкость промывалась дистиллированной водой и высушивалась. После этого вводился следующий раствор для тестирования. Глубина проникновения акустического поля в жидкость, например в дистиллированную воду,

составляет 0.1 мкм, а в глицерин 0.3 мкм, что является небольшой величиной по сравнению с толщиной исследуемой жидкости ($>1\text{мм}$) [158]. В связи с этим объем жидкости не влияет на результаты измерений. В эксперименте использовали образцы объемом 700 мкл. Также важно отметить, что жидкость помещалась в жидкостную кювету и не контактировала с ВШП.

На рисунке 1.3 представлена частотная зависимость вносимых потерь S_{12} , измеренная в одном из акустических каналов экспериментального образца с дистиллированной водой (черная линия) и исследуемой жидкостью (красная линия).

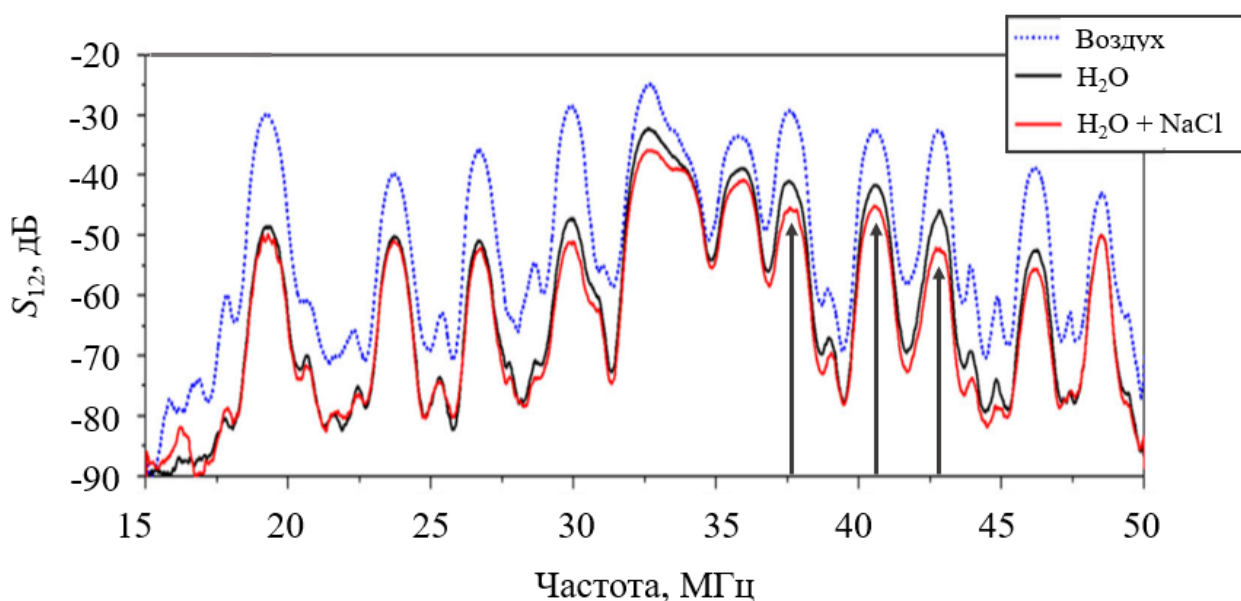


Рисунок 1.3. Типичный вид частотной зависимости вносимых потерь S_{12} акустических волн в пластине $128^\circ\text{Y}+90\text{ LiNbO}_3$ с дистиллированной водой (черная линия) и 0.9% водным раствором NaCl ($\sigma = 1.4\text{ См/м}$) (красная линия). Стрелки указывают на некоторые волны с высокими суммарными потерями.

На рисунке 1.3 стрелками показаны акустические волны, которые сильнее реагируют на изменения свойств исследуемых жидкостей. Это связано с различной поляризацией этих волн и различными значениями коэффициентов их электромеханической связи. Расчетные значения этих параметров для выбранных волн приведены в таблице 1.1. Кроме того, следует отметить, что из-за анизотропии материала пластины волны разных

типов, распространяющиеся в присутствии жидкости в разных направлениях, не испытывают равного акустического поглощения [1*-3*]. На основе анализа частотных зависимостей S_{12} были выбраны рабочие частоты акустических волн, которые наиболее сильно реагировали на конкретную жидкость. Таким образом, измерение S_{12} в пластине $128^\circ\text{Y}+\Theta$ LiNbO_3 для каждого направления распространения, определяемого углом θ , было выполнено для акустических волн с частотами, близкими к $f = 34 \pm 0.5$ МГц, 37 ± 0.8 МГц, 41 ± 0.5 МГц, 44 ± 1.0 МГц и 48 ± 0.8 МГц.

Набор полученных экспериментальных откликов, относящихся к различным акустическим волнам и каналам, был представлен в виде ориентационных гистограмм (рисунок 1.4). Угол каждой гистограммы соответствует углу θ , а на радиусе гистограммы отложено соответствующее значение отклика ΔS_{12} в дБ. Различные типы акустических волн отмечены разными цветами. Гистограммы для жидкостей с разными вкусами сравнивались на основе их формы, площадей, положения и значений характерных минимумов и максимумов.

Площади в dB^2 были определены путем суммирования площадей треугольников, составляющих каждую гистограмму. Стороны этих треугольников образованы откликами соседних волн $\Delta S(n)_{12}$ и $\Delta S(n+1)_{12}$. Угол между этими сторонами равен $\beta = 360^\circ/n$, где n - общее количество режимов, используемых во всех каналах [2*].

$$S = 0.5 * \sin(\beta) \sum [\Delta S_{12}^{(n)} + \Delta S_{12}^{(n+1)}] \quad (1.19)$$

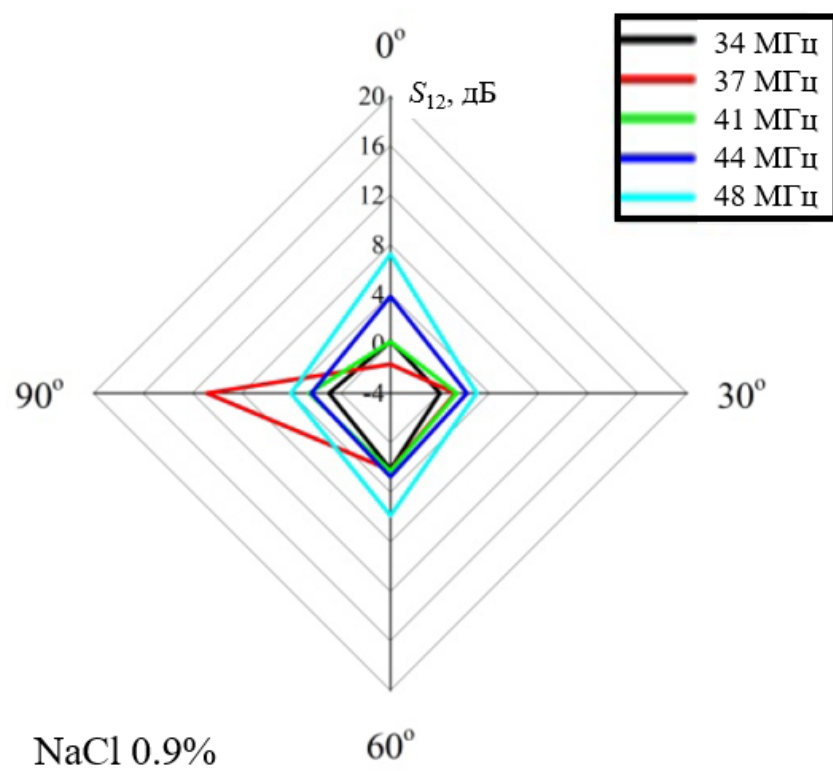
Очевидно, что чем сильнее акустический отклик волны, тем больше площадь гистограммы «вкуса» и, следовательно, тем выше суммарная чувствительность этой волны к общему влиянию всех параметров тестируемой жидкости. Как было сказано выше, что во всех направлениях распространения используются волны близкие по частоте. Однако в любом направлении распространения можно найти волну или набор волн, которые будут обладать высокой чувствительностью к исследуемой жидкости, но не будут встречаться в других направлениях. Добавление таких волн к одному из

каналов придаст более индивидуальный характер гистограмме. Однако, в данном случае мы их не рассматривали.

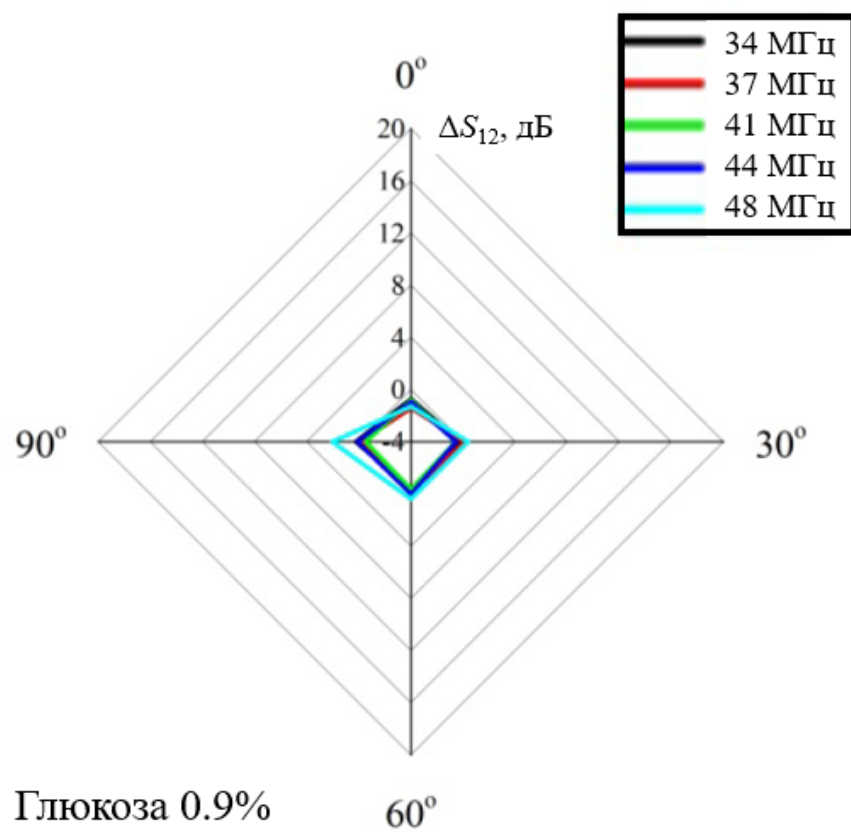
Из анализа таблицы 1.1 видно, что жидкости, использованные в эксперименте, различаются в первую очередь по проводимости и диэлектрической проницаемости. Однако сходные значения плотности и вязкости для разных жидкостей также могут аналогичным образом влиять на общий отклик волн различного порядка ΔS_{12} , при условии, что эти волны обладают высокой чувствительностью.

На рисунке 1.4 представлены ориентационные гистограммы для пяти исследованных базовых жидкостей, которые различаются по своим физическим свойствам и «вкусу», с концентрацией 0.9%. Для каждой жидкости были измерены вносимые потери акустических мод на заданной частоте. В результате показано, что величина S_{12} имеет различные значения в зависимости от направления распространения (угла θ), что соответствует результатам, полученным теоретически. 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.

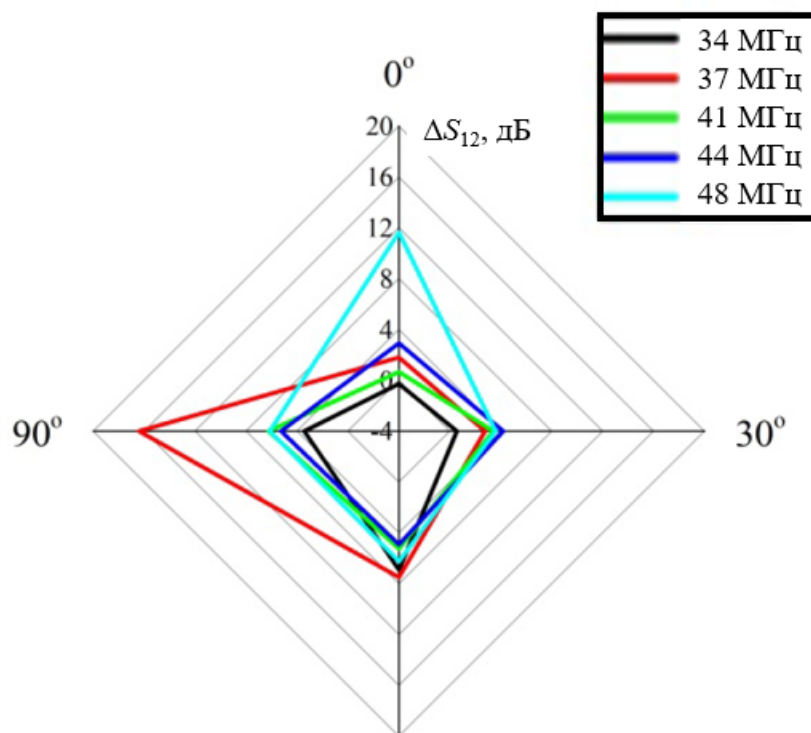
Видно, что построенные экспериментальные ориентационные гистограммы вкуса отличаются друг от друга, как по форме, так и по площади. Отклики от одних и тех же образцов в разных направлениях могут отличаться в несколько раз, так же, как и отклики от разных волн, распространяющихся в одном направлении. Значения акустических откликов на различные вкусы достигают $\Delta S_{12} = 20$ дБ, что обеспечивает их надежное измерение с точностью ± 0.1 дБ. Анализ показал, что при концентрации 0.9% раствор глюкозы проявляет наименьшую чувствительность во всех режимах и каналах из-за его низкой электропроводности и диэлектрической проницаемости, близкой к диэлектрической проницаемости воды.



a

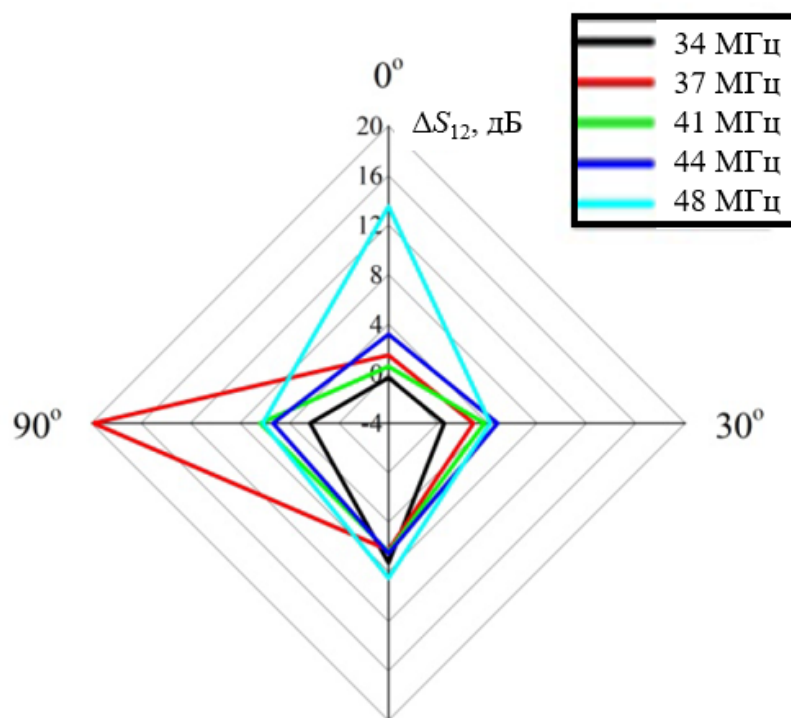


б



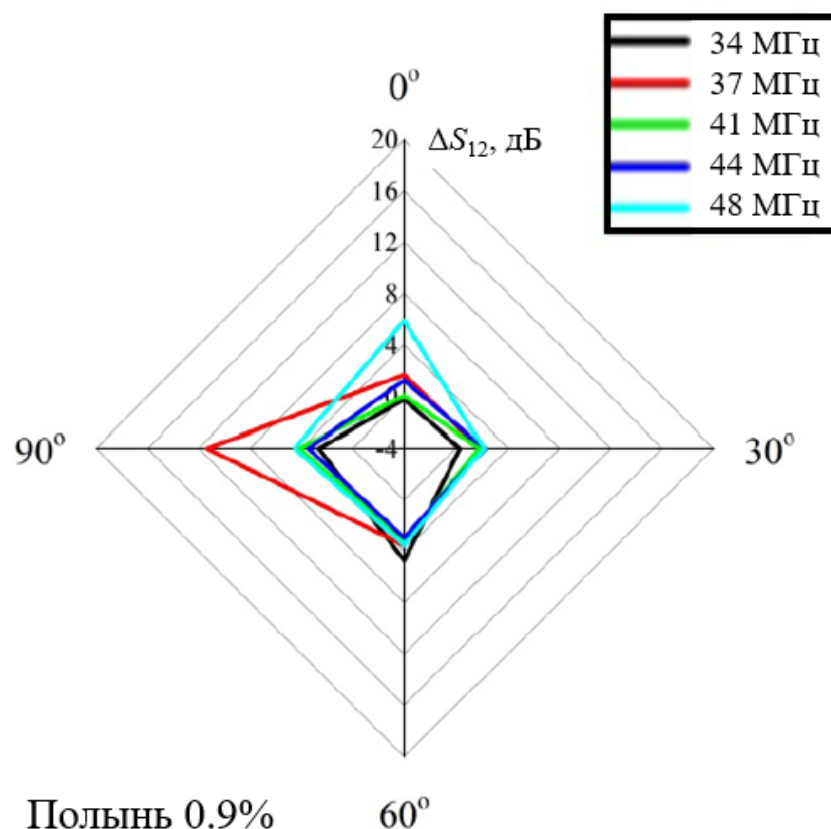
Лимонная кислота 0.9%

В



Глутамат
натрия 0.9%

Г



Д

Рисунок 1.4. Ориентационные гистограммы ΔS_{12} для акустических волн с различными рабочими частотами: ~ 34 МГц (черная линия), ~ 37 МГц (красная линия), ~ 41 МГц (зеленая линия), ~ 44 МГц (синяя линия) и ~ 48 МГц (голубая линия), распространяющихся в пластине $128^\circ\text{Y LiNbO}_3$ с нормированной толщиной $h/\lambda = 2.5$, в присутствии 0.9% водных растворов а) NaCl, б) глюкозы, в) лимонной кислоты, г) глутамата натрия и д) полыни.

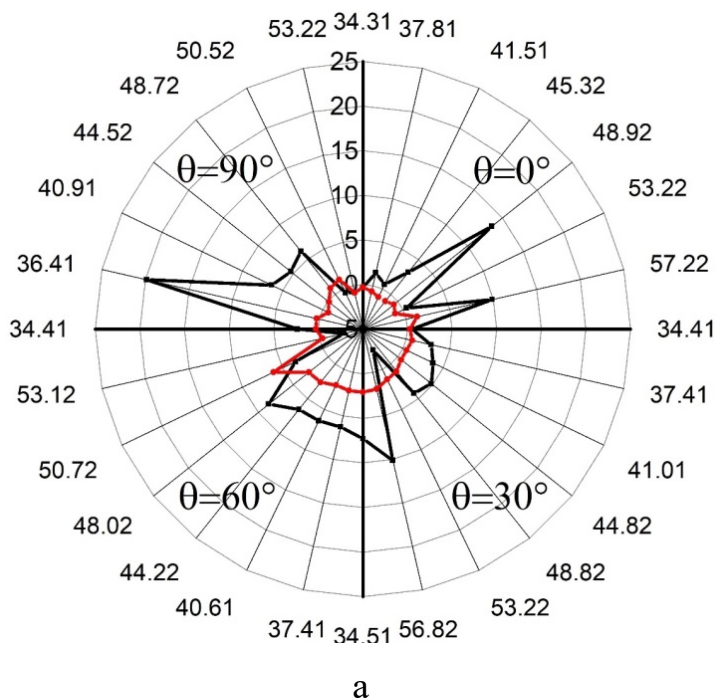
Для сравнения полученных ориентационных гистограмм были рассчитаны их площади S по формуле (1.19). Результаты представлены в таблице 1.9.

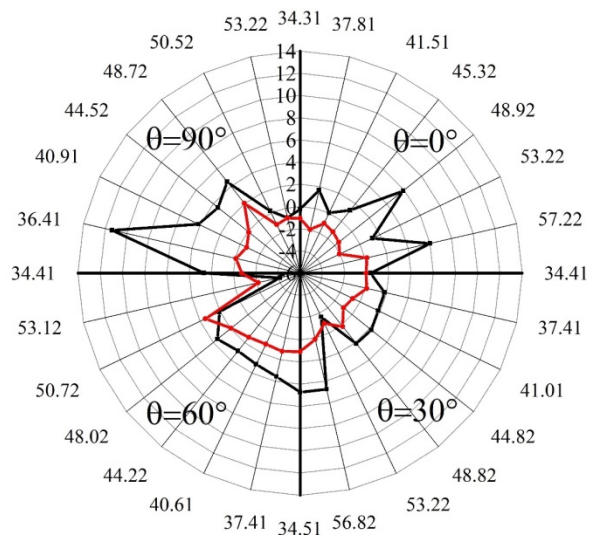
Таблица 1.9. Площади ориентационных гистограмм 0.9% водных растворов исследованных слабвязких жидкостей.

| f , МГц | ~ 34 | ~ 37 | ~ 41 | ~ 44 | ~ 48 | $S_{\text{ср}}$ | Pt |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|------|
| NaCl | 155.43 | 232.42 | 184.15 | 231.91 | 344.21 | 227.62 | 1.89 |
| Глюкоза | 119.59 | 115.78 | 110.41 | 117.08 | 138.92 | 120.356 | 1 |

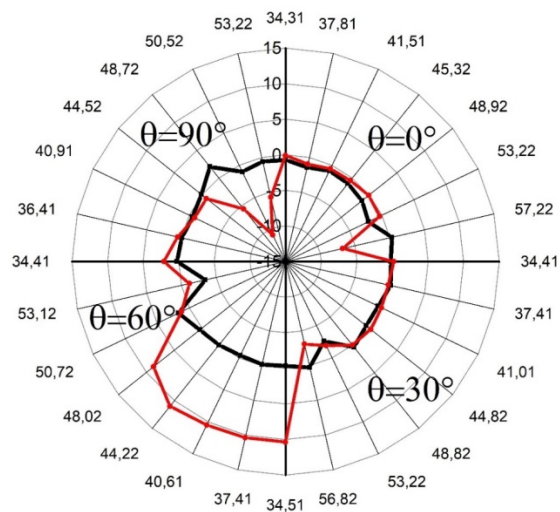
| | | | | | | | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|-------|
| Лимонная кислота | 225.97 | 444.42 | 281.01 | 303.13 | 453.53 | 338.012 | 2.8 |
| Глутамат натрия | 216.30 | 459.34 | 300.23 | 335.77 | 500.78 | 362.484 | 3.011 |
| Полынь | 194.36 | 309.60 | 210.35 | 218.76 | 287.53 | 244.12 | 2.02 |

В таблице 1.8 также представлены средние значения площадей полученных гистограмм S_{cp} и их весовые соотношения Pt для каждой жидкости. Очевидно, что акустические характеристики для разных слабвязких жидкостей значительно отличаются друг от друга. Это свидетельствует о потенциале предлагаемого метода для разработки акустических анализаторов, в том числе и «вкуса». Например, на рисунке 1.5 показаны экспериментальные результаты измерения ΔS_{12} для всех акустических режимов в выбранном диапазоне частот и всех 4 акустических каналах при $h/\lambda = 2.5$ в присутствии 0.02% (красная линия) и 0.9% (черная линия) водных растворов глутамата натрия, полыни, сахара, лимонной кислоты и NaCl на поверхности воды. Видно, что предлагаемый подход позволяет не только отличить один «вкус» от другого, но и позволяет регистрировать изменение его концентрации.

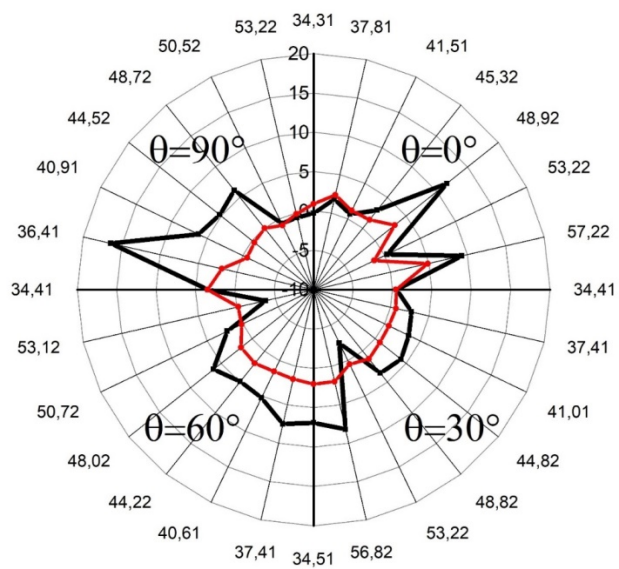




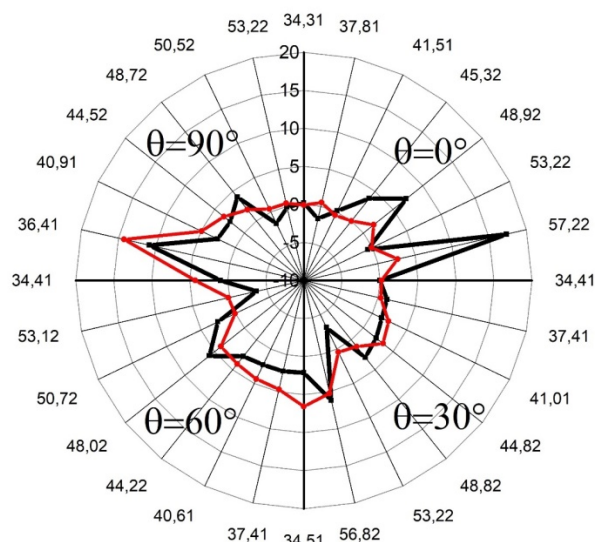
σ



B



Γ



Д

Рисунок 1.5. Комбинированные ориентационные гистограммы ΔS_{12} водных растворов глутамата натрия (а), полыни (б), сахара (в), лимонной кислоты (г) и NaCl (д) с концентрациями 0.02% (красная линия) и 0.9% (черная линия), измеренные с использованием всего набора акустических режимов в заданном диапазоне частот и всех каналов пластины $128^\circ\text{Y LiNbO}_3$ с нормированной толщиной $h/\lambda = 2.5$. По углу гистограммы отложена частота акустической моды в МГц для каждого угла Θ , по радиусу – значение ΔS_{12} .

На рисунках 1.6 – 1.8 представлены ориентационные гистограммы ΔS_{12} некоторых пищевых жидкостей (питьевая вода и алкоголь). В таблицах 1.10-1.12 представлены их площади, рассчитанные по формуле (1.19).

Анализ результатов показал, что их гистограммы имеют сходные характеристики с характеристиками пяти основных исследованных слабвязких жидкостей. Пищевые жидкости обладают акустическими характеристиками, которые зависят от направления распространения и типа волны, и существует оптимальное направление с наибольшей разницей в характеристиках. Оптимальное направление указано в таблицах 1.10-1.12 жирным шрифтом.

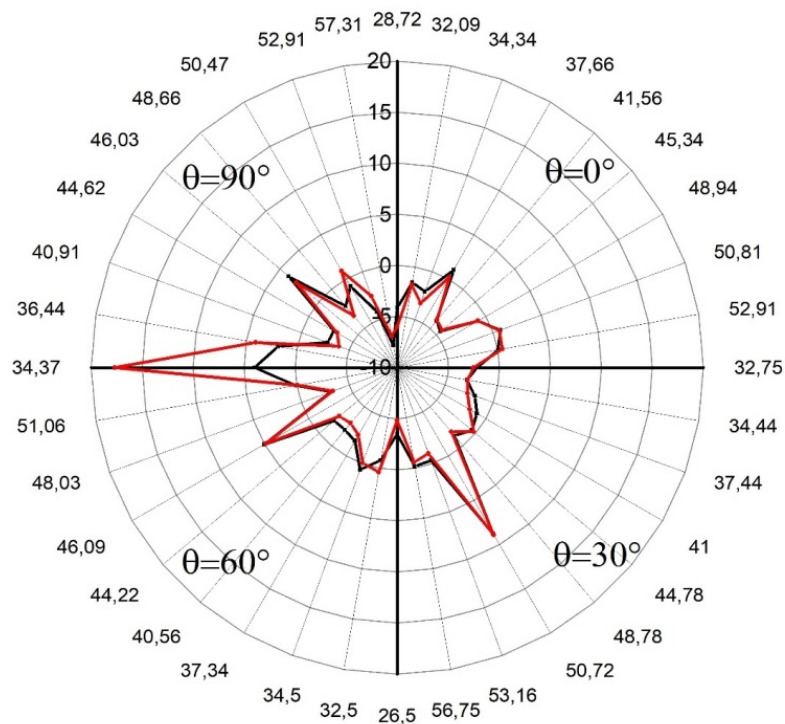


Рисунок 1.6. Комбинированные ориентационные гистограммы ΔS_{12} питьевой воды «Святой источник» (черная линия) и «Акваника» (красная линия), измеренные с использованием всего набора акустических режимов в заданном диапазоне частот и всех каналов пластины $128^\circ\text{Y LiNbO}_3$ с нормированной толщиной $h/\lambda = 2.5$. По углу гистограммы отложена частота акустической моды в МГц для каждого угла Θ , по радиусу – значение ΔS_{12} .

Таблица 1.10. Площади S_i ориентационных гистограмм питьевой воды.

| θ | S_1 H ₂ O «Святой источник» (Saint Spring) | S_2 H ₂ O «Акваника» (Aquanika) |
|------------|---|--|
| 0° | 198 (1) | 178 (0.9) |
| 30° | 279 (1) | 258 (0.92) |
| 60° | 236 (1) | 214 (0.9) |
| 90° | 219 (1) | 307 (1.4) |

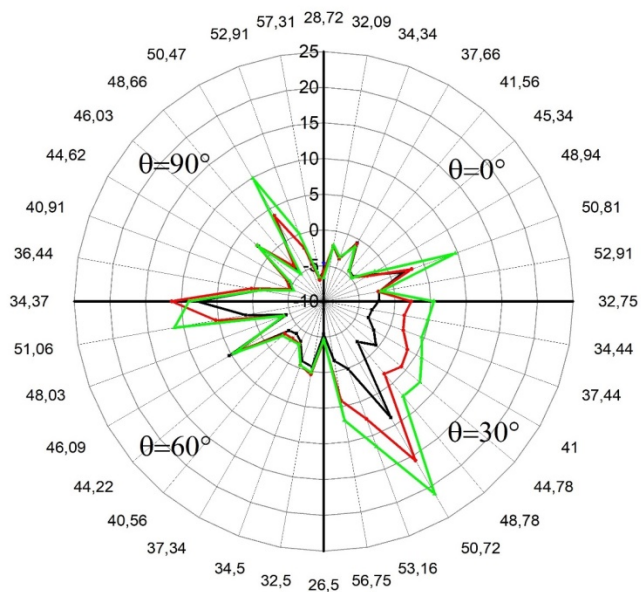


Рисунок 1.7. Комбинированные ориентационные гистограммы ΔS_{12} для крепкого алкоголя: водка «Царская» (черная линия), темный ром (красная линия) и коньяк «Старый Кенингсбер» (зеленая линия), измеренные с использованием всего набора акустических режимов в заданном диапазоне частот и всех каналов пластины $128^\circ\text{Y LiNbO}_3$ с нормированной толщиной $h/\lambda = 2.5$. По углу гистограммы отложена частота акустической моды в МГц для каждого угла Θ , по радиусу – значение ΔS_{12} .

Таблица 1.11. Площади ориентационных гистограмм S_i некоторых крепких алкогольных напитков

| θ | S_1 Водка «Царская золотая» (Россия) | S_2 Темный ром «Rhea» (Индия) | S_3 Коньяк «Старый Кенингсберг» (Россия) |
|------------------------------|--|---------------------------------------|---|
| 0° | 155 (1) | 157 (1.01) | 195 (1.26) |
| 30° | 252 (1) | 655 (2.6) | 1000 (4) |
| 60° | 179 (1) | 219 (1.22) | 244 (1.36) |
| 90° | 208 (1) | 237 (1.14) | 246 (1.18) |

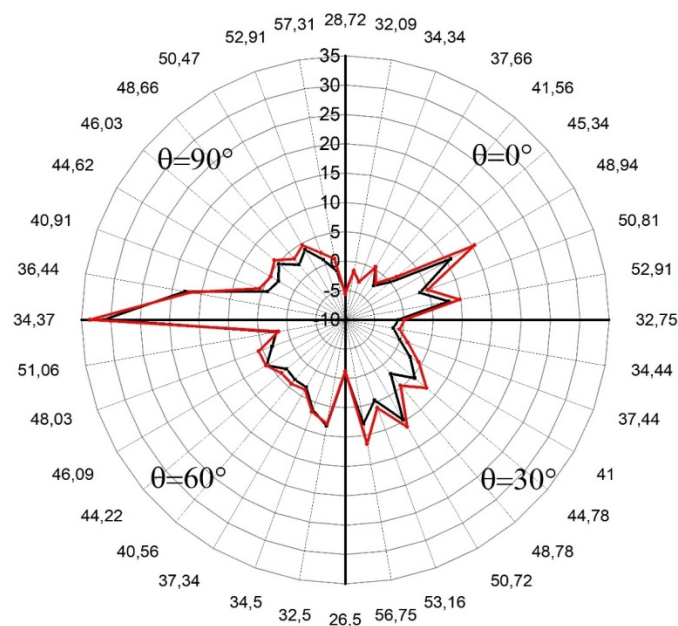


Рисунок 1.8. Комбинированные ориентационные гистограммы ΔS_{12} для вин: Белое вино «Risling High Coast» (черная линия) и Красное вино «Merlot High Coast», измеренные с использованием всего набора акустических режимов в заданном диапазоне частот и всех каналов пластины $128^\circ\text{Y LiNbO}_3$ с нормированной толщиной $h/\lambda = 2.5$. По углу гистограммы отложена частота акустической моды в МГц для каждого угла θ , по радиусу – значение ΔS_{12} .

Таблица 1.12. Площади ориентационных гистограмм S_i некоторых видов вина.

| θ | S_1 Белое вино «Risling High Coast» (Кубань, Россия) | S_2 Красное вино «Merlot High Coast» (Кубань, Россия) |
|------------------------------|---|--|
| 0° | 356 (1) | 448 (1.22) |
| 30° | 519 (1) | 673 (1.3) |
| 60° | 548 (1) | 590 (1.07) |
| 90° | 916 (1) | 1035 (1.13) |

1.3. Выводы к главе 1

Теоретически показано, что влияние различных слабовязких жидкостей на различные акустические моды в анизотропных пьезоэлектрических пластинах 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, но и их поляризацией [1*].

В случае слабопроводящих жидкостей типа водных растворов глюкозы, полыни или глутамата натрия важную роль играет различие их диэлектрических проницаемостей. Однако, коэффициент электромеханической связи используемых волн играет здесь гораздо меньшую роль, чем их механическая поляризация [1*].

Экспериментально показано, что ориентационные гистограммы изменения вносимых потерь $\Delta S_{12} = |S_{12}^{\text{ж-тб}}| - |S_{12}^{H_2O}|$ для различных типов акустических волн 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. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают выводы теории [1*-3*].

Для дальнейшей разработки многопараметрического акустического датчика было бы полезно использовать более анизотропный материал, такой как ниобат лития с X срезом. Необходимо провести более целенаправленный теоретический поиск конкретных волн, которые избирательно реагируют на механические и электрофизические свойства анализируемой жидкости. Кроме того, можно было бы провести анализ угла потока энергии для каждой выбранной акустической волны, чтобы оптимизировать конструкцию датчика. Учитывая этот фактор, можно было бы повысить эффективность датчика при приеме возбужденных акустических волн и снизить потери при преобразовании. Предлагаемый подход к созданию многопараметрического, многорежимного акустического электронного датчика и генерации набора гистограмм для различных жидкостей позволит нам разрабатывать устройства для эффективного анализа пищевых продуктов, лекарств, бензина,

авиационного топлива и других жидкостей без необходимости проведения
детального химического анализа.

Глава 2. Исследование влияния анизотропии пьезоэлектрических пластин на детектирование фазового перехода вода-лёд, возникающего на поверхности пластины, при помощи акустических волн

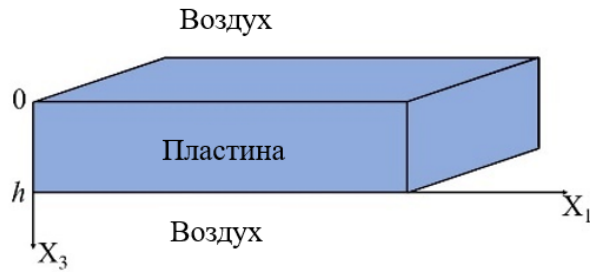
Как было сказано во введении, разработка методов контроля фазового перехода вода-жидкость имеет большое практическое значение. Очевидно, что разработка новых методов контроля невозможна без проведения соответствующих теоретических исследований. В главе 1 было показано, что благодаря анизотропии волн Лэмба различных типов в пьезоэлектрических пластинах возможна идентификация различных жидкостей без использования сенсорных пленок. Было сделано предположение, что анизотропия этих волн при распространении в пьезоэлектрической пластине может также быть использована для исследования процесса обледенения на поверхности пластины. К началу исследований, таких работ в мире и в России не проводилось.

2.1 Теоретический анализ влияния направления распространения акустических волн различных типов на изменение их свойств из-за фазового перехода вода-лед, возникающего на поверхности пьезоэлектрической пластины

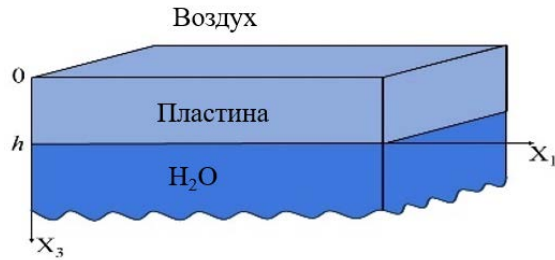
Для теоретического анализа были рассмотрены три структуры, такие как «воздух-пьезоэлектрическая пластина-воздух», «воздух-пьезоэлектрическая пластина-дистиллированная вода» и «воздух-пьезоэлектрическая пластина-лед» (рис. 2.1, а, б, в, соответственно). Для всех структур акустическая волна распространялась вдоль оси X_1 . Пьезоэлектрическая пластина была ограничена плоскостями $X_3 = 0$ и $X_3 = h$. Область с $X_3 > h$ соответствовала воздуху (рис. 2.1, а), дистиллированной воде (рис. 2.1, б) или льду (рис. 2.1, в), а область с $X_3 < 0$ соответствовала воздуху.

Для решения задачи о распространении акустических волн в таких структурах были записаны уравнения движения, уравнения Лапласа и

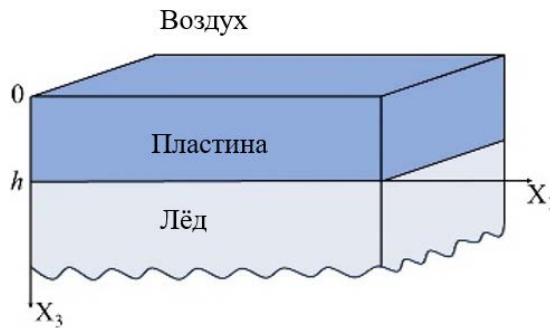
материальные уравнения для пьезоэлектрической пластины и льда, а также уравнение Лапласа для воздуха [4*]. Рассматриваемые задачи являлись двумерными, поэтому предполагалось, что все компоненты поля постоянны в направлении X_2 [139].



а



б



в

Рисунок 2.1. Геометрия теоретически рассмотренных структур: “воздух - пьезоэлектрическая пластина - воздух” (а), “воздух - пьезоэлектрическая пластина - дистиллированная вода” (б) и “воздух - пьезоэлектрическая пластина - лед” (в).

$$\rho^{pz} \partial^2 U_i^{pz} / \partial t^2 = \partial T_{ij}^{pz} / \partial x_j, \quad (2.1)$$

$$\partial D_j^{pz} / \partial x_j = 0, \quad (2.2)$$

$$T_{ij}^{pz} = C_{ijkl}^{pz} \partial U_l^{pz} / \partial x_k + e_{kij}^{pz} \partial \Phi^{pz} / \partial x_k, \quad (2.3)$$

$$D_j^{pz} = -\varepsilon_{jk}^{pz} \partial \Phi^{pz} / \partial x_k + e_{jlk}^{pz} \partial U_l^{pz} / \partial x_k, \quad (2.4)$$

$$\rho^{\text{лёд}, H_2O} \partial^2 U_i^{\text{лёд}/H_2O} / \partial t^2 = \partial T_{ij}^{\text{лёд}, H_2O} / \partial x_j, \quad (2.5)$$

$$\partial D_j^{\text{лёд}, H_2O} / \partial x_j = 0, \quad (2.6)$$

$$T_{ij}^{\text{лёд}, H_2O} = C_{ijkl}^{\text{лёд}, H_2O} \partial U_l^{\text{лёд}, H_2O} / \partial x_k, \quad (2.7)$$

$$D_j^{\text{лёд}, H_2O} = -\varepsilon_{jk}^{\text{лёд}, H_2O} \partial \Phi^{\text{лёд}, H_2O} / \partial x_k. \quad (2.8)$$

Здесь U_i , T_{ij} , x_j , D_j , Φ , t и ρ - компоненты механического смещения частиц, компоненты механического напряжения, координаты, компоненты электрической индукции, электрический потенциал, время и плотность соответственно. C_{ijkl} , e_{ikl} и e_{jk} - упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические постоянные, соответственно. Индексы « pz », «лёд» и H_2O соответствуют пьезоэлектрической пластине, льду и невязкой, непроводящей воде соответственно. Для области $X_3 < 0$ было записано соответствующее уравнение Лапласа:

$$\partial D_j^{\text{воздух}} / \partial x_j = 0, \quad (2.9)$$

где $D_j^{\text{воздух}} = -\varepsilon_0 \partial \Phi^{\text{воздух}} / \partial x_k$. Здесь ε_0 - диэлектрическая проницаемость воздуха, а индекс «воздух» указывает на то, что переменная относится к воздуху. При решении данной задачи использовалось условие квазистатического приближения

$$E_j = -\partial \Phi^{pz, \text{лёд}, H_2O, \text{воздух}} / \partial x_j. \quad (2.10)$$

Здесь E_j это компонента вектора напряженности электрического поля.

Решение искомое в виде плоских неоднородных волн, распространяющихся вдоль оси X_1 и имеющих заранее неизвестное распределение амплитуд по оси X_3 [163, 4*].

$$Y_j(x_1, x_3, t) = Y_j(x_3) e^{i\omega(t-x_1/V_{ph})}. \quad (2.11)$$

Здесь V_{ph} , ω фазовая скорость и круговая частота волны, соответственно. Y_j это нормированные переменные с размерностью H/m^2 , соответствующие компонентам механического смещения (U_1 , U_2 , U_3), нормальным компонентам механического напряжения (T_{13} , T_{23} , T_{33}), электрическому

потенциалу (Φ) и нормальной компоненте электрической индукции (D_3) для каждой из контактирующих сред.

$$Y_1^{pz} = \frac{\omega}{V} C_{1111}^{pz} U_1^{pz}; Y_2^{pz} = \frac{\omega}{V} C_{1111}^{pz} U_2^{pz}; Y_3^{pz} = \frac{\omega}{V} C_{1111}^{pz} U_3^{pz}; Y_4^{pz} = T_{13}^{pz}; Y_5^{pz} = T_{23}^{pz}; Y_5^{pz} = T_{23}^{pz}; Y_6^{pz} = T_{33}^{pz}, \quad (2.12)$$

$$Y_7^{pz} = \frac{\omega}{V} e^{pz} \Phi^{pz}; Y_8^{pz} = \frac{e^{pz}}{\varepsilon_{11}^{pz}} D_3^{pz} \quad (2.13)$$

$$Y_1^{\text{лёд}} = \frac{\omega}{V} C_{1111}^{\text{лёд}} U_1^{pz}; Y_2^{\text{лёд}} = \frac{\omega}{V} C_{1111}^{\text{лёд}} U_2^{\text{лёд}}; Y_3^{\text{лёд}} = \frac{\omega}{V} C_{1111}^{\text{лёд}} U_3^{\text{лёд}}; Y_4^{\text{лёд}} = T_{13}^{\text{лёд}}; Y_5^{\text{лёд}} = T_{23}^{\text{лёд}}; Y_5^{\text{лёд}} = T_{23}^{\text{лёд}}; Y_6^{\text{лёд}} = T_{33}^{\text{лёд}}, \quad (2.14)$$

$$Y_7^{\text{лёд}} = \frac{\omega}{V} e^{\text{лёд}} \Phi^{\text{лёд}}; Y_8^{\text{лёд}} = \frac{e^{\text{лёд}}}{\varepsilon_{11}^{\text{лёд}}} D_3^{\text{лёд}}, \quad (2.15)$$

$$Y_3^{H_2O} = \frac{\omega}{V} C_{1111}^{pz} U_3^{H_2O}; Y_6^{H_2O} = T_{33}^{H_2O}, \quad (2.16)$$

$$Y_7^{H_2O} = \frac{\omega}{V} e^{pz} \Phi^{H_2O}; Y_8^{H_2O} = \frac{e^{pz}}{\varepsilon_{11}^{pz}} D_3^{H_2O}, \quad (2.17)$$

$$Y_7^{\text{воздух}} = \frac{\omega}{V} e^{pz} \Phi^{\text{воздух}}; Y_8^{\text{воздух}} = \frac{e^{pz}}{\varepsilon_{11}^{pz}} D_3^{\text{воздух}}, \quad (2.18)$$

Здесь $e^{pz} = 1 \text{ C/м}^2$.

Выражение (2.11) подставлялось в уравнения (2.1) - (2.10). При этом переменные $T_{11}, T_{22}, T_{12}, D_1, D_2$ исключались из рассмотрения, поскольку они не дифференцировались по координате X_3 в уравнениях (2.1) - (2.10).

В результате были получены системы обыкновенных дифференциальных линейных уравнений для каждой контактирующей среды. Количество этих уравнений составляло для пьезоэлектрических пластин 8, для механической и электрической частей задачи для льда 6 и 2, соответственно, для механической и электрической частей задачи для воды 2 и 2, соответственно, для воздуха - 2. В дальнейшем эти системы были переписаны в виде:

$$[dY_j^{pz} / dx_3] = [C^{pz}] Y_j^{pz} \quad j=1-8, \quad (2.19)$$

$$\text{Мех.ч.} \left[\frac{dY_j^{\text{лёд}}}{dx_3} \right] = [C^{\text{лёд}}] Y_j^{\text{лёд}}, j=1-6, \quad \text{Эл.ч.} \left[\frac{dY_j^{\text{лёд}}}{dx_3} \right] = [C^{\text{лёд}}] Y_j^{\text{лёд}}, j=7-8, \quad (2.20)$$

$$\text{Мех.ч. } \left[\frac{dY_j^{H_2O}}{dx_3} \right] = [C^{H_2O}] Y_j^{H_2O}, j=3,6, \text{ Эл.ч. } \left[\frac{dY_j^{H_2O}}{dx_3} \right] = [C^{H_2O}] Y_j^{H_2O}, j=7-8, \quad (2.21)$$

$$\left[dY_j^{\text{воздух}} / dx_3 \right] = [C^{\text{воздух}}] Y_j^{\text{воздух}}, j=7-8. \quad (2.22)$$

В результате вычислений были получены собственные значения (ζ_k) и компоненты собственных векторов (Y_{jk}) этих матриц.

Общее решение для каждой среды было записано в виде:

$$Y_j^{pz} = \sum_{k=1}^8 A_k^{pz} Y_{jk}^{pz} e^{\zeta_j^{pz} x_3} e^{i\omega(t-x_1/V)}, \quad (2.23)$$

$$Y_j^{\text{лёд}} = \sum_{k=1}^8 A_k^{\text{лёд}} Y_{jk}^{\text{лёд}} e^{\zeta_j^{\text{лёд}} x_3} e^{i\omega(t-x_1/V)}, \quad (2.24)$$

$$Y_j^{H_2O} = \sum_{k=1}^4 A_k^{H_2O} Y_{jk}^{H_2O} e^{\zeta_j^{H_2O} x_3} e^{i\omega(t-x_1/V)}, \quad (2.25)$$

$$Y_j^{\text{воздух}} = \sum_{k=1}^2 A_k^{\text{воздух}} Y_{jk}^{\text{воздух}} e^{\zeta_j^{\text{воздух}} x_3} e^{i\omega(t-x_1/V)}. \quad (2.26)$$

В результате для каждой из контактирующих сред получалась система обыкновенных дифференциальных линейных уравнений. Для пьезоэлектрической пластины, льда, воды и воздуха количество этих уравнений составляло 8, 8, 4, и 2, соответственно. Далее из коэффициентов при членах dY_j/dX_3 и Y_j для каждой из сред записывались матрицы $[C]$ и находились их собственные значения и собственные вектора.

Весовые коэффициенты A_k^{pz} , $A_k^{\text{лёд}}$, $A_k^{H_2O}$ и $A_k^{\text{воздух}}$, а также фазовая скорость V_ϕ являются неизвестными величинами. Чтобы найти их, необходимо использовать соответствующие граничные условия.

Следует отметить, что в случае контакта пластины с полубезграничной средой (лед, вода, воздух) необходимо делать выбор собственных значений, соответствующих физическим условиям задачи. Во всех случаях для электрических переменных выбирались собственные значения, соответствующие их убыванию вглубь полубезграничной среды. Что касается механических переменных, то выбирались собственные значения, соответствующие их нарастанию вглубь среды. Такой выбор был обусловлен необходимостью учета излучения акустической энергии волны вглубь контактирующей среды [139, 163].

Электрические и механические условия на границах $X_3 = 0$ и $X_3 = h$ каждой структуры были записаны следующим образом [139]:

$$X_3=0: T_{i3}^{pz} = 0; \Phi^{pz} = \Phi^{\text{воздух}}; D_3^{pz} = D_3^{\text{воздух}}, \quad (2.27)$$

$X_3=h$ (контакт с воздухом) :

$$T_{i3}^{pz} = 0; \Phi^{pz} = \Phi^{\text{воздух}}; D_3^{pz} = D_3^{\text{воздух}}, \quad (2.28)$$

$X_3=h$ (контакт H_2O):

$$U_3^{pz} = U_3^{\text{H}_2\text{O}}; T_{33}^{pz} = T_{33}^{\text{H}_2\text{O}}; T_{13}^{pz} = T_{23}^{pz} = 0; \Phi^{pz} = \Phi^{\text{H}_2\text{O}}; D_3^{pz} = D_3^{\text{H}_2\text{O}}, \quad (2.29)$$

$X_3=h$ (контакт со льдом):

$$U_i^{pz} = U_i^{\text{лёд}}; T_{i3}^{pz} = T_{i3}^{\text{лёд}}; \Phi^{pz} = \Phi^{\text{лёд}}; D_3^{pz} = D_3^{\text{лёд}}. \quad (2.30)$$

Здесь $i = 1 - 3$, а h - толщина пьезоэлектрической пластины.

Фазовая скорость V_ϕ акустической волны является параметром записанных матриц граничных условий таблиц 2.1. – 2.3. Значения фазовой скорости волны (V_ϕ) и трех компонент механического смещения (U_1, U_2, U_3) в плоскости $X_3=h$ были определены с помощью процедуры итерационного поиска, основанной на обнулении определителя матрицы, представляющей соответствующие граничные условия [4*].

После этого весовые коэффициенты A_k^{pz} , $A_k^{\text{лёд}}$, $A_k^{\text{H}_2\text{O}}$ и $A_k^{\text{воздух}}$ были рассчитаны с использованием соответствующих матриц граничных условий, что позволило определить три компоненты механического смещения (U_1, U_2, U_3) в плоскости $x_3 = h$.

Значения материальных констант для LiNbO_3 , LiTaO_3 , воды при $T = 20^\circ\text{C}$ и льда при $T = -15^\circ\text{C}$ были взяты из [164-166]. Все материальные постоянные, использованные при расчете, представлены в таблице 2.4.

Следует отметить, что при расчете характеристик акустических волн в присутствии льда был проведен учет влияния температуры (-15°C) на их фазовую скорость и затухание. В результате было обнаружено, что при такой температуре скорость акустических волн увеличивается на 0.5 - 1%, а затухание практически не изменяется. В связи с этим в данной работе

использовались результаты, полученные без учета влияния температуры на материальные постоянные пьезоэлектрических пластин.

Таблица 2.1. Матрица граничных условий для акустической задачи на рисунке 2.1 а.

| Воздух I | Пьезоэлектрическая пластина | | | | | | | | Воздух II |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 0 | $T_{13}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{13}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{13}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{13}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{13}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{13}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{13}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{13}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 |
| 0 | $T_{23}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{23}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{23}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{23}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{23}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{23}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{23}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{23}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 |
| 0 | $T_{33}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{33}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{33}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{33}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{33}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{33}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{33}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{33}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 |
| $-\Phi^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $\Phi^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $\Phi^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $\Phi^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $\Phi^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $\Phi^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $\Phi^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $\Phi^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $\Phi^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 |
| $-D_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $D_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $D_3^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $D_3^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $D_3^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $D_3^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $D_3^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $D_3^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $D_3^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 |
| 0 | $T_{13}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{13}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{13}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{13}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{13}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{13}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{13}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{13}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 |
| 0 | $T_{23}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{23}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{23}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{23}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{23}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{23}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{23}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{23}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 |
| 0 | $T_{33}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{33}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{33}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{33}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{33}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{33}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{33}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{33}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 |
| 0 | $\Phi^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $\Phi^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $\Phi^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $\Phi^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $\Phi^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $\Phi^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $\Phi^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $\Phi^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | $-\Phi^{(1)} e^{\xi_1 h}$ |
| 0 | $D_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $D_3^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $D_3^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $D_3^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $D_3^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $D_3^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $D_3^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $D_3^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | $-D_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ |
| $X_3 = 0$ | | | | | | | | | |
| $X_3 = h$ | | | | | | | | | |

Таблица 2.2. Матрица граничных условий для акустической задачи на рисунке 2.1 б.

| Воздух | Пьезоэлектрическая пластина | | | | | | | | H ₂ O | |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| | $T_{13}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{13}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{13}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{13}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{13}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{13}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{13}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{13}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | 0 |
| 0 | $T_{23}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{23}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{23}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{23}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{23}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{23}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{23}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{23}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | 0 |
| 0 | $T_{33}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{33}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{33}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{33}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{33}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{33}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{33}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{33}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | 0 |
| $-\Phi^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $\Phi^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $\Phi^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $\Phi^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $\Phi^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $\Phi^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $\Phi^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $\Phi^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $\Phi^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | 0 |
| $-D_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $D_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $D_3^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $D_3^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $D_3^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $D_3^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $D_3^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $D_3^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $D_3^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | 0 |
| 0 | $U_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $U_3^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $U_3^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $U_3^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $U_3^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $U_3^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $U_3^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $U_3^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | $-U_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | 0 |
| 0 | $T_{13}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{13}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{13}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{13}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{13}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{13}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{13}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{13}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | 0 |
| 0 | $T_{23}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{23}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{23}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{23}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{23}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{23}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{23}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{23}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | 0 |
| 0 | $T_{33}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{33}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{33}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $T_{33}^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $T_{33}^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $T_{33}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{33}^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $T_{33}^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | $-T_{33}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | 0 |
| 0 | $\Phi^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $\Phi^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $\Phi^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $\Phi^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $\Phi^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $\Phi^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $\Phi^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $\Phi^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | $-\Phi^{(1)} e^{\xi_1 h}$ |
| 0 | $D_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $D_3^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $D_3^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | $D_3^{(4)} e^{\xi_4 h}$ | $D_3^{(5)} e^{\xi_5 h}$ | $D_3^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $D_3^{(7)} e^{\xi_7 h}$ | $D_3^{(8)} e^{\xi_8 h}$ | 0 | $-D_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ |
| $X_3 = 0$ | | | | | | | | | | |
| $X_3 = h$ | | | | | | | | | | |

Таблица 2.3. Матрица граничных условий для акустической задачи на рисунке 2.1 в.

| Воздух | | Пьезоэлектрическая пластина | | | | | | | | Лёд | | | |
|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|--|
| 0 | $T_{13}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{13}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{13}^{(3)} e^{\xi_3 l}$ | $T_{13}^{(4)} e^{\xi_4}$ | $T_{13}^{(5)} e^{\xi_5 l}$ | $T_{13}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{13}^{(7)} e^{\xi_7}$ | $T_{13}^{(8)} e^{\xi_8 l}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 0 | $T_{23}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{23}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{23}^{(3)} e^{\xi_3 l}$ | $T_{23}^{(4)} e^{\xi_4}$ | $T_{23}^{(5)} e^{\xi_5 l}$ | $T_{23}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{23}^{(7)} e^{\xi_7}$ | $T_{23}^{(8)} e^{\xi_8 l}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 0 | $T_{33}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{33}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{33}^{(3)} e^{\xi_3 l}$ | $T_{33}^{(4)} e^{\xi_4}$ | $T_{33}^{(5)} e^{\xi_5 l}$ | $T_{33}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{33}^{(7)} e^{\xi_7}$ | $T_{33}^{(8)} e^{\xi_8 l}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| $-\Phi^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $\Phi^{(1)} e^{\xi_1 l}$ | $\Phi^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $\Phi^{(3)} e^{\xi_3 l}$ | $\Phi^{(4)} e^{\xi_4}$ | $\Phi^{(5)} e^{\xi_5}$ | $\Phi^{(6)} e^{\xi_6 l}$ | $\Phi^{(7)} e^{\xi_7}$ | $\Phi^{(8)} e^{\xi_8 l}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| $-D_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $D_3^{(1)} e^{\xi_1 l}$ | $D_3^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $D_3^{(3)} e^{\xi_3 l}$ | $D_3^{(4)} e^{\xi_4}$ | $D_3^{(5)} e^{\xi_5 l}$ | $D_3^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $D_3^{(7)} e^{\xi_7}$ | $D_3^{(8)} e^{\xi_8 l}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 0 | $U_1^{(1)} e^{\xi_1 l}$ | $U_1^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $U_1^{(3)} e^{\xi_3 l}$ | $U_1^{(4)} e^{\xi_4}$ | $U_1^{(5)} e^{\xi_5}$ | $U_1^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $U_1^{(7)} e^{\xi_7}$ | $U_1^{(8)} e^{\xi_8 l}$ | $-U_1^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $-U_1^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $-U_1^{(3)} e^{\xi_3 l}$ | 0 | |
| 0 | $U_2^{(1)} e^{\xi_1 l}$ | $U_2^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $U_2^{(3)} e^{\xi_3 l}$ | $U_2^{(4)} e^{\xi_4}$ | $U_2^{(5)} e^{\xi_5}$ | $U_2^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $U_2^{(7)} e^{\xi_7}$ | $U_2^{(8)} e^{\xi_8 l}$ | $-U_2^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $-U_2^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $-U_2^{(3)} e^{\xi_3 l}$ | 0 | |
| 0 | $U_3^{(1)} e^{\xi_1 l}$ | $U_3^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $U_3^{(3)} e^{\xi_3 l}$ | $U_3^{(4)} e^{\xi_4}$ | $U_3^{(5)} e^{\xi_5}$ | $U_3^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $U_3^{(7)} e^{\xi_7}$ | $U_3^{(8)} e^{\xi_8 l}$ | $-U_3^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $-U_3^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $-U_3^{(3)} e^{\xi_3 l}$ | 0 | |
| 0 | $T_{13}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{13}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{13}^{(3)} e^{\xi_3 l}$ | $T_{13}^{(4)} e^{\xi_4}$ | $T_{13}^{(5)} e^{\xi_5 l}$ | $T_{13}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{13}^{(7)} e^{\xi_7}$ | $T_{13}^{(8)} e^{\xi_8 l}$ | $-T_{13}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $-T_{13}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $-T_{13}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | 0 | |
| 0 | $T_{23}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{23}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{23}^{(3)} e^{\xi_3 l}$ | $T_{23}^{(4)} e^{\xi_4}$ | $T_{23}^{(5)} e^{\xi_5 l}$ | $T_{23}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{23}^{(7)} e^{\xi_7}$ | $T_{23}^{(8)} e^{\xi_8 l}$ | $-T_{23}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $-T_{23}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $-T_{23}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | 0 | |
| 0 | $T_{33}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $T_{33}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $T_{33}^{(3)} e^{\xi_3 l}$ | $T_{33}^{(4)} e^{\xi_4}$ | $T_{33}^{(5)} e^{\xi_5 l}$ | $T_{33}^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $T_{33}^{(7)} e^{\xi_7}$ | $T_{33}^{(8)} e^{\xi_8 l}$ | $-T_{33}^{(1)} e^{\xi_1 h}$ | $-T_{33}^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $-T_{33}^{(3)} e^{\xi_3 h}$ | 0 | |
| 0 | $\Phi^{(1)} e^{\xi_1 l}$ | $\Phi^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $\Phi^{(3)} e^{\xi_3 l}$ | $\Phi^{(4)} e^{\xi_4}$ | $\Phi^{(5)} e^{\xi_5}$ | $\Phi^{(6)} e^{\xi_6 l}$ | $\Phi^{(7)} e^{\xi_7}$ | $\Phi^{(8)} e^{\xi_8 l}$ | 0 | 0 | 0 | $-\Phi^{(1)} e^{\xi_1 l}$ | |
| 0 | $D_3^{(1)} e^{\xi_1 l}$ | $D_3^{(2)} e^{\xi_2 h}$ | $D_3^{(3)} e^{\xi_3 l}$ | $D_3^{(4)} e^{\xi_4}$ | $D_3^{(5)} e^{\xi_5 l}$ | $D_3^{(6)} e^{\xi_6 h}$ | $D_3^{(7)} e^{\xi_7}$ | $D_3^{(8)} e^{\xi_8 l}$ | 0 | 0 | 0 | $-D_3^{(1)} e^{\xi_1 l}$ | |

Таблица 2.4. Плотность ρ (кг/м³), упругие постоянные C_{ij} (ГПа), пьезоэлектрические коэффициенты e_{ij} (Кл/м²) и диэлектрическая проницаемость e_{ij}/ϵ_0 LiNbO₃ и LiTaO₃, использованные в расчетах.

| LiNbO ₃ ($\rho=4650$) | | | | | | |
|------------------------------------|------------|------------|------------|----------------------------|----------------------------|------------|
| C_{11}^E | C_{12}^E | C_{13}^E | C_{14}^E | C_{33}^E | C_{44}^E | C_{66}^E |
| 203 | 57.3 | 75.2 | 8.5104 | 242.4 | 59.5 | 72.8 |
| e_{15} | e_{16} | e_{31} | e_{33} | ϵ_{11}/ϵ_0 | ϵ_{33}/ϵ_0 | |
| 3.84 | -2.37 | 0.23 | 1.3 | 44.305 | 27.9 | |
| LiTaO ₃ ($\rho=7454$) | | | | | | |
| C_{11}^E | C_{12}^E | C_{13}^E | C_{14}^E | C_{33}^E | C_{44}^E | C_{66}^E |
| 232.8 | 46.5 | 83.6 | -10.5 | 275.9 | 94.9 | 93.15 |
| e_{15} | e_{16} | e_{31} | e_{33} | ϵ_{11}/ϵ_0 | ϵ_{33}/ϵ_0 | |
| 2.64 | -1.68 | -0.22 | 1.71 | 40.904 | 42.5 | |

В соответствие с экспериментальными образцами расчеты проводились для акустических волн различных типов в пластинах 128°Y-X+Θ ниобата лития ($h/\lambda = 2.5$), Y-X+Θ ниобата лития ($h/\lambda = 2.5$) и 36°Y-X+Θ тантала лития ($h/\lambda = 1.75$) в диапазоне частот 20 - 60 МГц для углов распространения $\Theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ от кристаллографической оси X [4*].

В результате расчетов также определялись коэффициент электромеханической связи рассмотренных волн и их поляризация на поверхности пьезоэлектрической пластины ($X_3 = h$), нормированная на продольную компоненту U_1 . Идентификация волны осуществлялась по совпадению расчетного и экспериментального значений ее рабочей частоты.

В результате решения системы уравнений (2.1)-(2.4), (2.9), (2.10) с учетом граничных условий (2.27), (2.28) были получены значения фазовых скоростей акустических волн ($v_{\text{воздух}}^{th}$), их коэффициентов электромеханической связи (k^2) и поляризация (U_1, U_2, U_3) в интересующем нас частотном диапазоне в пластинах 128°Y-X+Θ ниобата лития ($h/\lambda = 2.5$), Y-X+Θ ниобата лития ($h/\lambda = 2.5$) и 36°Y-X+Θ тантала лития ($h/\lambda = 1.75$) для

углов распространения $\Theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ к оси X. Это позволило выявить пьезоактивные волны, которые могут возбуждаться при таких условиях [4*].

Далее путем решения системы уравнений (2.1) - (2.10) с учетом граничных условий (2.27), (2.29) были решена задача о распространении акустических волн в структуре «пьезоэлектрическая пластина – полубезграничный слой воды». В качестве начальных значений скорости волн при расчетах использовались результаты, полученные для тех же пластин без нагрузки. В результате были определены фазовая скорость акустических волн в присутствии дистиллированной воды ($v_{H_2O}^{th}$), их затухание ($\Gamma_{H_2O}^{th}$) и поляризация в плоскости $X_3 = h$.

Затухание по мощности в дБ/λ рассчитывалось, как и в главе 1 по формуле [161]:

$$\Gamma^{th} = \frac{4\pi Im(V_{ph})}{0.23 Re(V_{ph})} \quad (2.31)$$

На следующем этапе решалась задача о распространении акустических волн в структуре «пьезоэлектрическая пластина – полубезграничный слой льда». Для этого использовалась система уравнений (2.1) - (2.10) с учетом граничных условий (2.27), (2.30). В результате также были получены значения фазовых скоростей акустических волн ($v_{л\ddot{e}д}^{th}$), их затухание ($\Gamma_{л\ddot{e}д}^{th}$) и поляризация в плоскости $X_3 = h$.

В таблицах 2.5-2.7 приведены теоретические значения фазовых скоростей для экспериментально определенных частотных диапазонов существования акустических волн в исследуемых пластинах. Следует отметить, что теоретически полученные частоты акустических волн отличаются от экспериментально измеренных частот на 1-2 МГц. Это связано с различием (в основном для льда) значений материальных постоянных сред, взятых из литературы, и материалов, использованных в эксперименте.

Таблица 2.5. Теоретически полученные параметры акустических волн в пластине YX+ Θ -LiNbO₃, $h/\lambda = 1.75$.

| f^r , МГц | $v_{\text{воздух}}^T$, км/с | k^2 , % | $U_1; U_2; U_3$ | $v_{H_2O}^T$, км/с | $v_{\text{лед}}^T$, км/с | $\Delta\Gamma_{\text{лед}-H_2O}^T$, дБ/λ |
|---------------------|---------------------------------|-----------|-----------------|------------------------|---------------------------|--|
| $\Theta = 0^\circ$ | | | | | | |
| 40.8 | 14.288 | 3.9 | 1;12;1 | 14.260 | 14.286 | 24.8 |
| 44.1 | 15.425 | 5.6 | 1;0;0.2 | 15.399 | 15.424 | 26.6 |
| 47.5 | 16.641 | 2.4 | 1; 15;2.4 | 16.622 | 16.639 | 21.5 |
| $\Theta = 30^\circ$ | | | | | | |
| 36.5 | 12.753 | 4.6 | 1;3;0.7 | 12.722 | 12.751 | 27.8 |
| 40.5 | 14.201 | 3.6 | 1;0;0.3 | 14.181 | 14.199 | 29.4 |
| 44.2 | 15.458 | 5.1 | 1;0.2;0.1 | 15.431 | 15.456 | 26.8 |
| $\Theta = 60^\circ$ | | | | | | |
| 21.5 | 7.517 | 2.0 | 1;0.1;0.4 | 7.474 | 7.512 | 50.2 |
| 36.9 | 12.932 | 1.5 | 1;0.4;0.4 | 12.922 | 12.931 | 31.6 |
| 40.4 | 14.138 | 1.8 | 1;0.7;0.1 | 14.127 | 14.137 | 28.4 |
| $\Theta = 90^\circ$ | | | | | | |
| 26.4 | 9.251 | 1.4 | 1;0;0.7 | 9.234 | 9.249 | 42.5 |
| 33.5 | 11.732 | 1.6 | 1;0;0.6 | 11.718 | 11.731 | 34.6 |
| 44.6 | 15.633 | 7.2 | 1;0;0.4 | 15.597 | 15.630 | 26 |

Таблица 2.6. Теоретически полученные параметры акустических волн в пластине $128^\circ\text{YX}+\Theta\text{-LiNbO}_3$, $h/\lambda=2.5$.

| f^r , МГц | $v_{\text{воздух}}^T$, км/с | k^2 , % | $U_1; U_2; U_3$ | $v_{H_2O}^T$, км/с | $v_{\text{лед}}^T$, км/с | $\Delta\Gamma_{\text{лед}-H_2O}^T$, дБ/λ |
|---------------------|---------------------------------|-----------|-----------------|------------------------|------------------------------|--|
| $\Theta = 0^\circ$ | | | | | | |
| 26.3 | 13.140 | 1.3 | 1;0.1;0.3 | 13.129 | 13.139 | 19.3 |
| 47.4 | 23.747 | 2.3 | 1;0;0.3 | 23.736 | 23.746 | 11.2 |
| 50.3 | 25.164 | 4.4 | 1; 0;0.1 | 25.142 | 25.163 | 10.1 |
| $\Theta = 30^\circ$ | | | | | | |
| 25.2 | 12.619 | 2.9 | 1;0.7;1 | 12.594 | 12.618 | 17.5 |

| | | | | | | |
|---------------------|--------|-----|-----------|--------|--------|------|
| 34.0 | 17.001 | 3.6 | 1;0.5;0.3 | 16.980 | 17.001 | 15.0 |
| 37.4 | 18.711 | 2.0 | 1;2.8;5.1 | 18.697 | 18.711 | 13.3 |
| $\Theta = 60^\circ$ | | | | | | |
| 33.4 | 16.703 | 1.5 | 1;0.6;0.2 | 16.697 | 16.703 | 16.7 |
| 34.2 | 17.093 | 0.8 | 1;0.9;2.6 | 17.088 | 17.092 | 15.2 |
| 37.1 | 18.537 | 0.9 | 1;5.5;7.4 | 18.531 | 18.536 | 14.1 |
| $\Theta = 90^\circ$ | | | | | | |
| 29.4 | 14.702 | 1.0 | 1;0;1.4 | 14.694 | 14.701 | 17.4 |
| 37.2 | 18.568 | 1.1 | 1;0;1.8 | 18.560 | 18.567 | 14.3 |
| 41.2 | 20.597 | 0.4 | 1;0;0.2 | 20.595 | 20.597 | 13.6 |

Таблица 2.7. Теоретически полученные параметры акустических волн в пластине $36^\circ\text{YX}+\Theta\text{-LiTaO}_3$, $h/\lambda=2.5$.

| f^T , МГц | $v_{\text{воздух}}^T$, км/с | k^2 , % | $U_1; U_2; U_3$ | $v_{H_2O}^T$, км/с | $v_{\text{лёд}}^T$, км/с | $\Delta\Gamma_{\text{лёд}-H_2O}^T$, дБ/λ |
|---------------------|---------------------------------|-----------|-----------------|------------------------|------------------------------|--|
| $\Theta = 0^\circ$ | | | | | | |
| 39.1 | 19.555 | 1.3 | 1;0.1;1.6 | 19.550 | 19.555 | 8.9 |
| 41.4 | 20.719 | 2.1 | 1;2.6;40 | 20.713 | 20.719 | 8.6 |
| 56.4 | 28.222 | 2.2 | 1; 1.4;5.3 | 28.217 | 28.221 | 6.4 |
| $\Theta = 30^\circ$ | | | | | | |
| 43.8 | 21.901 | 0.9 | 1;0.2;1 | 21.899 | 21.901 | 7.9 |
| 34.0 | 17.001 | 3.6 | 1;0.5;0.3 | 16.980 | 17.001 | 7.9 |
| 37.4 | 18.711 | 2.0 | 1;2.8;5.1 | 18.697 | 18.711 | 7.0 |
| $\Theta = 60^\circ$ | | | | | | |
| 21.3 | 10.627 | 0.2 | 1;0.8;0.4 | 10.626 | 10.626 | 16.4 |
| 44.3 | 22.145 | 2.0 | 1;0.6;2.5 | 22.138 | 22.144 | 7.9 |
| 51.6 | 25.818 | 2.1 | 1;0.5;4.8 | 25.812 | 25.817 | 6.9 |
| $\Theta = 90^\circ$ | | | | | | |
| 41.7 | 20.871 | 1.7 | 1;0;2.6 | 20.865 | 20.871 | 8.3 |

| | | | | | | |
|------|--------|-----|---------|--------|--------|-----|
| 42.4 | 21.210 | 0.9 | 1;0;0.4 | 21.207 | 21.210 | 8.1 |
| 47.6 | 23.800 | 0.6 | 1;0;0.2 | 23.798 | 23.800 | 7.1 |

Таким образом, проведенный теоретический анализ показал, что фазовая скорость акустических волн практически не изменяется в присутствии жидкости или льда. Также не изменяется и поляризация исследуемых волн в присутствии нагрузки. Это может быть связано с малым акустическим импедансом воды и льда по сравнению с пьезоэлектрическими пластинами. Следует отметить, что в присутствии нагрузки появляется затухание акустических волн, связанное с радиационными потерями при их распространении. В основном, эти потери больше в присутствии льда, чем в присутствии воды.

Анализ теоретических результатов также показал, 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.

Также было обнаружено, что волны, имеющие большую компоненту U_2 , характеризуются меньшей чувствительностью к фазовому переходу, чем волны с наибольшими компонентами U_1 или U_3 . Например, волны в $Y, X+30^\circ$ - $LiNbO_3$ при $f = 40.53$ МГц, и в $Y, X+60^\circ$ - $LiNbO_3$, при $f = 56.5$ МГц, являются, соответственно, наиболее и наименее чувствительными к фазовому переходу. При этом их эллиптические поляризации имеют вид $\{1, 0.4, 0.4\}$ и $\{1, 3.2, 0.8\}$, соответственно. Таким образом, при проектировании устройств для детекции фазового перехода вода/лед можно рекомендовать использовать акустические волны с максимальными компонентами U_1 и U_3 .

2.2 Экспериментальное исследование влияния анизотропии пьезоэлектрических пластин на особенности распространения в них акустических волн различных типов в присутствии фазового перехода вода-лед на поверхности пластины

Три образца экспериментальных устройств были изготовлены из пластин $128^\circ Y$ -среза ниобата лития ($h = 500$ мкм), Y -среза ниобата лития ($h = 500$ мкм) и $36^\circ Y$ -среза танталата лития ($h = 350$ мкм). Пьезоэлектрические пластины были приобретены в CQT (Hangzhou, China). На полированной поверхности каждой пластины по кругу под углами 0° , 30° , 60° и 90° к оси X были расположены четыре линии задержки. Эти углы были выбраны исходя из максимальной анизотропии данной кристаллографической ориентации, как указано в [3, 162]. Экспериментальные образцы измерительных устройств были изготовлены по методике, подробно описанной в пункте 1.2. данной работы.

Входные и выходные ВШП одинаковой топологии имели период $h = 200$ мкм и располагались по кругу в 4-х каналах под углами $\Theta = 0^\circ$, 30° , 60° , 90° к кристаллографической оси X . В центре окружности находилась кювета (диаметр 18 мм) с анализируемым веществом. Распространяясь по разным направлениям, волны Лэмба разных порядков испытывали разное акустическое поглощение, поскольку в анизотропной пластине чувствительность каждой из волн к одинаковым физическим параметрам жидкости неодинакова. Из-за разницы в фазовых скоростях V_ϕ частоты волн $f = V_\phi / \lambda$ для каждого сочетания Θ , порядка волны и h / λ были также различны. Следует отметить, что из-за анизотропии пьезоэлектрических пластин потоки энергии большинства волн, распространяющихся по направлениям низкой симметрии ($\Theta = 30^\circ$ и 90°), не совпадают с направлением распространения [162]. Однако, величины углов отклонения потоков энергии были невелики (менее 5°), что позволяло регистрировать возбуждаемые волны выходными преобразователями. Упругие поляризации волн зависели от направления распространения (угла Θ), толщины пластины h / λ и номера моды. При

фиксированных Θ , h/λ , номер моды они включали в себя весь спектр известных модификаций волн Лэмба, а именно колебания по эллипсу, у которого продольная, сдвигово-горизонтальная и вертикальная смещения сравнимы друг с другом ($U_1 \sim U_2 \sim U_3$), колебания сдвигово-горизонтальной ($U_2 \gg U_1, U_3$) и квази-продольной ($U_1 \gg U_2, U_3$) поляризации, а также колебания по эллипсу параллельному поверхностям пластины ($U_1 \sim U_2, U_3 \approx 0$) и эллипсу, перпендикулярному как поверхностям пластины и направлению распространения ($U_2 \sim U_3, U_1 \approx 0$) [36, 45, 167].

Измерения вносимых потерь S_{12} для каждой пары преобразователей 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 анализатор четырехполюсников KEYSIGHT 5061B (Keysight, SantaRosa, CA, USA), работающий в амплитудном формате $S_{21}(f)$. Для изменения температуры использовался climaticchamber UC-20CE (Terchy, Nantou, Taiwan), работающий в температурном диапазоне -60°C до $+50^\circ\text{C}$. Установка, использованная для экспериментов представлена на рисунке 2.2.

Вначале измерения проводились с дистиллированной водой при температуре 20°C . При этом вязкость жидкости 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 трансформировалась в лед, а сигнал начинал изменяться. После стабилизации сигнала измерения коэффициента S_{12} повторяли в присутствии образовавшегося льда. Акустическим откликом волн на фазовый переход вещества из одного агрегатного состояния в другое служило изменение вносимых потерь $\Delta S_{12} = |S_{12}^{\text{лед}}| - |S_{12}^{H_2O}|$ в дБ. Эта величина позволяла сравнивать влияние фазового перехода на волны Лэмба разных порядков с разным направлением распространения 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 [146]. В наших экспериментах использовались образцы жидкости с объемом 500 мкл.

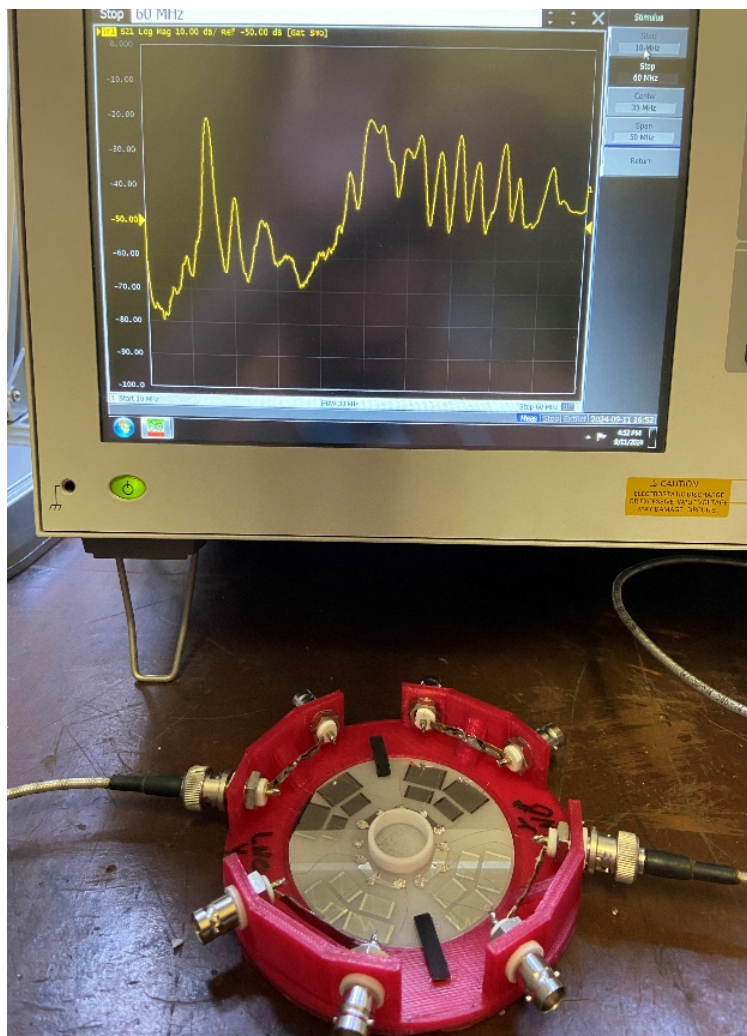


Рисунок 2.2. Установка и образец для проведения экспериментов.

Эксперименты показали, что в большинстве случаев переход воды из жидкого в твердое состояние в основном сопровождается увеличением вносимых потерь S_{12} и положительными значениями их разности ΔS_{12} . Величина ΔS_{12} зависит от направления распространения, частоты волны, толщины и материала пластины.

На рисунке 2.3 приведены типичные частотные зависимости вносимых потерь S_{12} (а) и их изменение ΔS_{12} (б), измеренные для $36^\circ\text{YX-LiTaO}_3$, $h = 500$ мкм, $\lambda = 200$ мкм, $h/\lambda = 2.5$, $\Theta = 0^\circ$ в отсутствии нагрузки ($+20^\circ\text{C}$, черная линия), в присутствии дистиллированной воды ($+20^\circ\text{C}$, красная линия) и льда (-15°C , синяя линия) в кювете. Стрелками отмечены волны с максимальными

значениями ΔS_{12} : $f = 36.69$ МГц, $\Delta S_{12} = 27.2$ дБ (1), $f = 56.69$ МГц, $\Delta S_{12} = 29.3$ дБ (2). Анализ экспериментальных результатов показал, что максимальные значения 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 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 направления, существуют как волны с высокой чувствительностью к фазовому переходу, так и волны почти не чувствительные к нему.

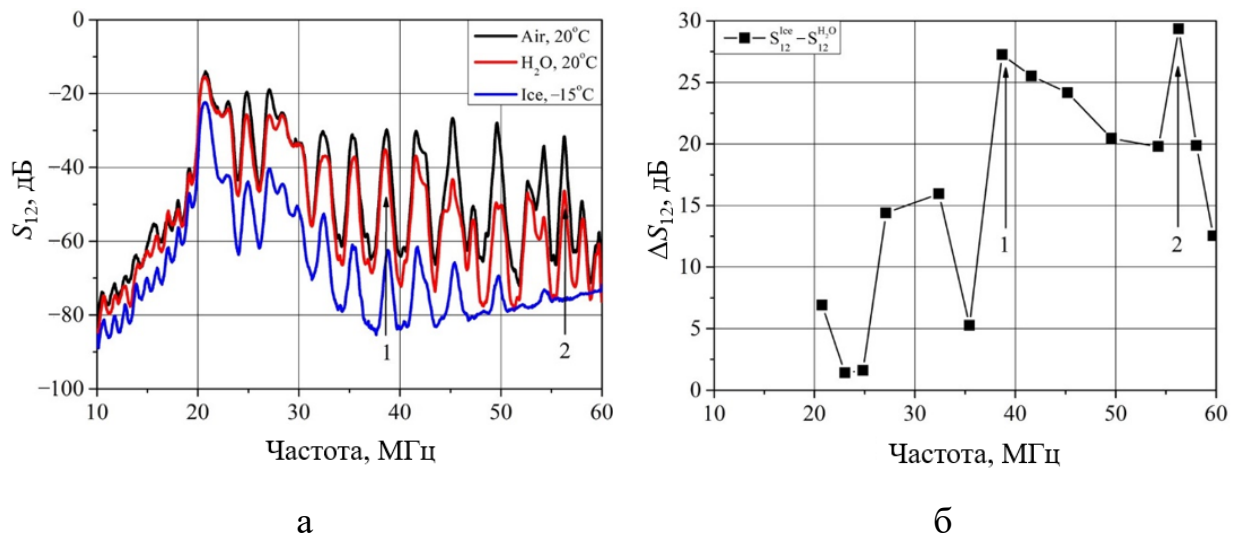


Рисунок 2.3. Типичный вид частотных зависимостей вносимых потерь S_{12} (а) и их изменения ΔS_{12} (б), измеренных в пластине $36^\circ\text{YX-LiTaO}_3$ при $h/\lambda = 2.5$ в отсутствии нагрузки ($+20^\circ\text{C}$, черная линия), в присутствии дистиллированной воды ($+20^\circ\text{C}$, красная линия) и льда (-15°C , синяя линия). Волны с наибольшими значениями ΔS_{12} : $f = 36.69$ МГц, $\Delta S_{12} = 27.2$ дБ (1), $f = 56.69$ МГц, $\Delta S_{12} = 29.3$ дБ (2).

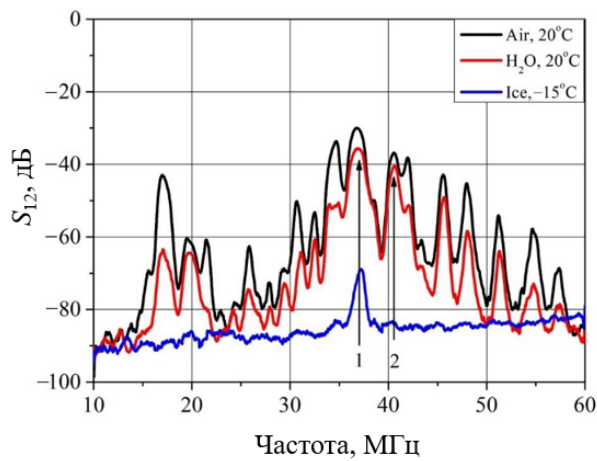
В Таблице 2.8 приведены экспериментально измеренные максимальные значения ΔS_{12} для акустических волн в пластинах $128^\circ\text{Y-X}+\Theta$ ниобата лития ($h/\lambda = 2.5$), $\text{Y-X}+\Theta$ ниобата лития ($h/\lambda = 2.5$) и $36^\circ\text{Y-X}+\Theta$ тантала лития ($h/\lambda = 1.75$) в диапазоне частот 20 – 60 МГц для углов распространения $\Theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$, а также соответствующие рабочие частоты.

Таблица 2.8. Экспериментально измеренные максимальные значения ΔS_{12} и соответствующие рабочие частоты при анализе фазового перехода вода/лед

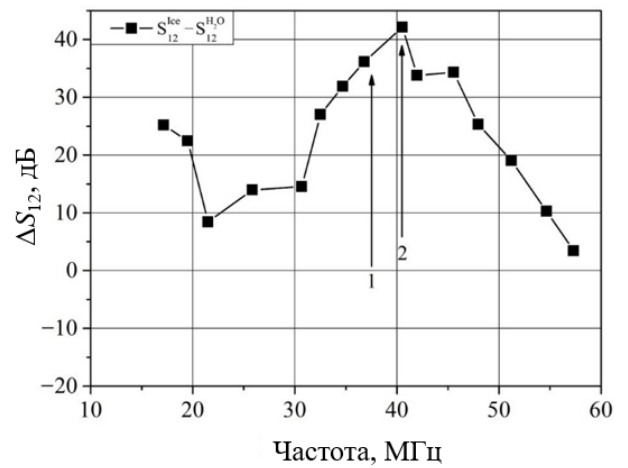
для акустических волн в пьезоэлектрических пластинах $YX+\Theta$ $LiNbO_3$, $128^\circ YX+\Theta$ $LiNbO_3$ и $36^\circ YX+\Theta$ $LiTaO_3$ при различных направлениях распространения Θ .

| Пластина $YX+\Theta$ $LiNbO_3$, $h = 350$ мкм, $\lambda = 200$ мкм, $h/\lambda=1.75$. | | | | | | | |
|--|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| $\Theta=0^\circ$ | | $\Theta=30^\circ$ | | $\Theta=60^\circ$ | | $\Theta=90^\circ$ | |
| f , МГц | ΔS_{12} , дБ | f , МГц | ΔS_{12} , дБ | f , МГц | ΔS_{12} , дБ | f , МГц | ΔS_{12} , дБ |
| 42.1 | 31.9 | 36.8 | 36.2 | 21.59 | 28.3 | 25.38 | 32.2 |
| 45.6 | 31.8 | 40.53 | 42.1 | 36.34 | 37.5 | 34.28 | 26.5 |
| 48.1 | 28.7 | 45.56 | 34.9 | 40.25 | 38.6 | 44.34 | 28.2 |
| Пластина $128^\circ YX+\Theta$ $LiNbO_3$, $h = 500$ мкм, $\lambda = 200$ мкм, $h/\lambda=2.5$. | | | | | | | |
| 26.25 | 23.6 | 24.66 | 23.9 | 33.25 | 27.6 | 29.1 | 14.4 |
| 46.22 | 21.4 | 34.78 | 26 | 35.08 | 28.5 | 38.06 | 18.8 |
| 50.16 | 22 | 38.06 | 26 | 37.84 | 30.6 | 41.5 | 20.6 |
| Пластина $36^\circ YX+\Theta$ $LiTaO_3$, $h = 500$ мкм, $\lambda = 200$ мкм, $h/\lambda=2.5$. | | | | | | | |
| 38.69 | 27.2 | 43.78 | 28.25 | 21.25 | 24.5 | 41.25 | 25.8 |
| 41.59 | 25.5 | 52.72 | 29.4 | 44.13 | 24.3 | 43.16 | 25.1 |
| 56.28 | 29.3 | | | 52.66 | 27.7 | 48.69 | 27.1 |

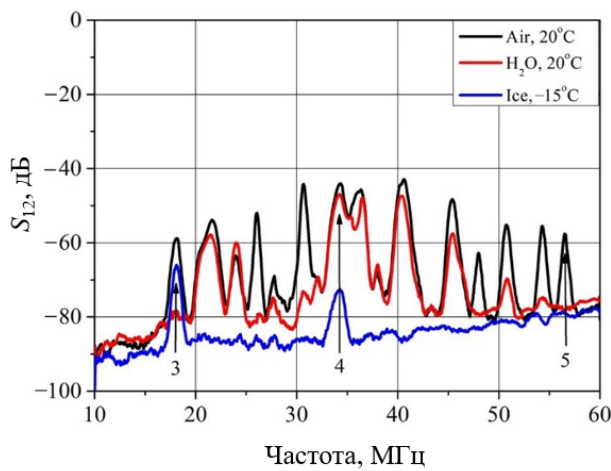
Экспериментально обнаружены необычные комбинации материал пластины/толщина, пластины/направление распространения (рисунок 2.4), для которых образование льда приводило к полному поглощению всех волн за исключением одной (рис.2.4, а, $f = 36.8$ МГц) или двух (рис.2.4, в, $f = 18.13$ МГц, 34.3 МГц). Также были обнаружены волны, для которых вносимые потери S_{12} при образовании льда уменьшаются, что соответствует увеличению амплитуды акустического сигнала и отрицательному значению отклика ΔS_{12} . Например, для волны с частотой $f = 18.13$ МГц в пластине $YX+60^\circ LiNbO_3$ при $h/\lambda = 1.75$ $\Delta S_{12} = -12.3$ дБ (0.7 дБ/мм) (рисунок 2.4, в, г).



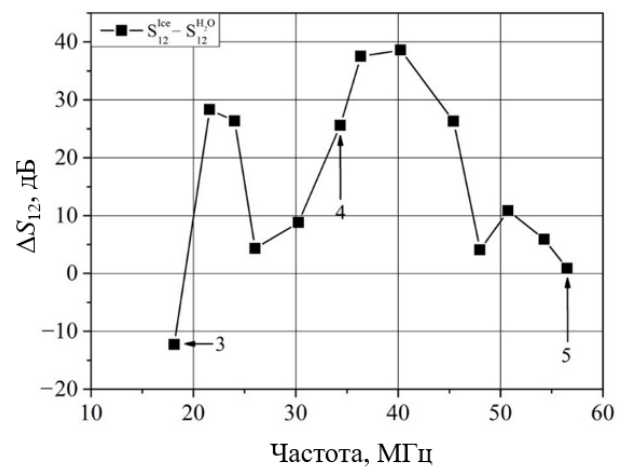
а



б



в



г

Рисунок 2.4. Нетипичный вид частотных зависимостей вносимых потерь S_{12} (а, б) и их изменения ΔS_{12} (в, г), измеренных в пластинах $YX+30^\circ\text{-LiNbO}_3$ (а, б) и $YX+60^\circ\text{-LiNbO}_3$ (в, г) при $h/\lambda = 1.75$. Анализируемые волны: $f = 36.8$ МГц, $\Delta S_{12} = 36.2$ дБ (1); $f = 40.53$ МГц, $\Delta S_{12} = 42.1$ дБ (2); $f = 18.1$ МГц, $\Delta S_{12} = -12.3$ дБ (3); $f = 34.3$ МГц, $\Delta S_{12} = 25.6$ дБ (4); $f = 56.5$ МГц, $\Delta S_{12} = 0.87$ дБ (5).

Очевидно, что физические причины обнаруженных аномалий связаны с анизотропией пластин, характеристиками акустических волн и свойствами нагрузки. Для выяснения причин такой аномалии был проведен теоретический анализ влияния жидкости и льда на акустическую волну в пластине $YX+60^\circ \text{LiNbO}_3$ при $h/\lambda = 1.75$ и $f = 18.1$ МГц с отрицательным значением отклика $\Delta S_{12} = -12.3$ дБ или 0.7 дБ\мм (рис. 2.4 в (3)) показал, что в ненагруженной пластине рабочая частота этой волны $f = 19.8$ МГц, фазовая

скорость $v = 6952$ м/с, $k^2 = 4.6\%$, упругая поляризация $\{1, 11, 2\}$, т.е. данная волна является квази-поперечной. При нагрузке пластины дистиллированной водой данная волна исчезает (что необычно при такой поляризации), а при образовании льда она снова появляется (как показал эксперимент, рис.2.4,в,(3)). Скорость этой волны близка к таковой без нагрузки (6951 м/с), а упругая поляризация по-прежнему соответствует квазипоперечной волне. Таким образом, в анизотропных пластинах существуют необычные волны и кристаллографические направления при распространении по которым, суммарное поглощение акустических волн в присутствии льда меньше, чем в присутствии воды.

2.3. Выводы к главе 2

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 [4*].

Показано, что волны, имеющие большую компоненту U_2 , характеризуются меньшей чувствительностью к фазовому переходу, чем волны с наибольшими компонентами U_1 или U_3 . Например, волны в $Y, X+30^\circ$ - $LiNbO_3$ при $f = 40.53$ МГц, и в $Y, X+60^\circ$ - $LiNbO_3$, при $f = 56.5$ МГц, являются, соответственно, наиболее и наименее чувствительными к фазовому переходу. При этом их поляризации $\{U_1, U_2, U_3\}$ имеют вид $\{1, 0.4, 0.4\}$ и $\{1, 3.2, 0.8\}$, соответственно. Таким образом, при проектировании устройств для детекции фазового перехода вода/лед можно рекомендовать использовать акустические волны с максимальными компонентами U_1 и U_3 [4*].

Экспериментально обнаружены необычные комбинации материал пластины/толщина, материал пластины/направление распространения, для которых образование льда приводит к полному поглощению всех волн за исключением одной [4*].

Обнаружены волны, для которых вносимые потери S_{12} при образовании льда уменьшаются, что соответствует уменьшению амплитуды акустического сигнала и отрицательному значению отклика ΔS_{12} . Теоретический анализ этой ситуации показал, что в ненагруженной пластине рабочая частота этой волны $f = 19.8$ МГц, фазовая скорость $v = 6952$ м/с, $k^2 = 4.6\%$, упругая поляризация $\{1, 11, 2\}$, т.е. данная волна является квази-поперечной. При нагрузке пластины дистиллированной водой данная волна исчезает (что необычно при такой поляризации), а при образовании льда она снова появляется (как показал эксперимент). Скорость этой волны близка к таковой без нагрузки (6951 м/с), а упругая поляризация по-прежнему соответствует квазипоперечной волне [4*]. Таким образом, в анизотропных пластинах существуют необычные волны и кристаллографические направления при распространении по которым, суммарное поглощение акустических волн в присутствии льда меньше, чем в присутствии воды. Выяснение физических причин такой аномалии требует дополнительного экспериментального и теоретического исследования.

Глава 3. Исследование влияния анизотропии пьезоэлектрических пластин на взаимодействие акустических волн различных типов с биологическими и вязкими суспензиями, расположенными на поверхности пластины

Как было сказано во введении важным аспектом является разработка методов контроля присутствия клеток жизнеспособных микроорганизмов в фармацевтических растворах, медицинских и биологических препаратах, субстанциях и других материалах. Одним из таких методов является возможность формирования биогенных наночастиц металлов микроорганизмами в ответ на воздействие на них солями этих металлов. Важно подчеркнуть, что все живые клетки обладают природной способностью восстанавливать катионы (для защиты от их токсического действия) до нуль-валентного состояния и формировать нетоксичные кристаллические наноструктуры. Самосборку нанокристаллов, ассоциированных с клетками, может усиливать и способность микроорганизмов синтезировать поверхностные биополимеры, например, экзополисахариды. Для биообъектов, генерирующих *de novo* биогенные наночастицы в таких условиях, закрепилось понятие - микробные клетки, капсулированные наночастицами металлов. Подобное взаимодействие является специфическим и основной задачей является именно регистрация появления наночастиц в растворе из клеток. В данной работе предложено использовать многоканальное многомодовое акустоэлектронное устройство для этих целей.

Другой областью применения такого метода является обеспечение контроля состояния различных масел или вязких жидкостей. Этот аспект важен в связи с необходимостью разработки методов контроля качества топлив или машинных масел, которые необходимо менять при загрязнении. В связи с вышесказанным в данной главе экспериментально исследована возможность применения многоканального многомодового

акустоэлектронного устройства для решения задач идентификации биологических жидкостей с различными бактериальными клетками или идентификации загрязнения такой вязкой жидкости, как силиконовое масло.

3.1 Влияние биологических суспензий, содержащих различные бактериальные клетки, на свойства акустических волн различных типов в пьезоэлектрических пластинах в зависимости от их анизотропии

Для апробации разработанного метода, описанного в п. 1.2, были выбраны аэробные, грамположительные бактерии - *Rhodococcus sp.* и аэробные, грамотрицательные бактерии *Metylobacterium sp.*, которые встречаются в широком диапазоне сред (вода, почва, и биотопы, связанные с месторождением нефти, газа и озокеритов).

Метилотрофные бактерии родов *Metylobacterium* и *Rhodococcus* культивировали с использованием комплексной ростовой культуральной среды Лурье-Бертрана следующего состава: (г/л воды): глюкоза – 10; триптон – 10; дрожжевой экстракт – 5; NaCl – 9; MgSO₄•7H₂O – 0,2; CaCl₂ – 0,02. Для приготовления твердой среды LB вносили агар из расчета 12 – 18 г/л. Среду стерилизовали автоклавированием в течение 30 минут при 121°C (1 атм) [63, 64].

Получение биогенных наночастиц FeNPs, в максимальной степени сорбированных на поверхности бактериальных клеток, проводилось по следующему протоколу [63, 64]:

- в качестве восстанавливающих агентов использовалась суспензия клеток культуры-продуцента, прошедших ту или иную пробоподготовку;
- на поверхность гидрофобной плёнки («Parafilm», США) наносилось 50 мкл суспензии клеток бактерий;
- использовались суспензии с титром бактериальных клеток 10^6 мл⁻¹,
- источник катионов вносился в виде стерильного водного раствора FeCl₃ в концентрации 0.02 mM в объёме 10 мкл;

- время реакции восстановления варьировалось в интервале 20- 40 минут;

- в качестве контрольных аликвот использовались реакционные смеси со свежей суспензией клеток культуры-продуцента, не проходившей обработку.

Для синтеза наночастиц оксида железа в суточную культуру добавлялся стерильный раствор FeCl_3 в концентрации 0.02 мМ и инкубировался в колбах при 30°C и интенсивном перемешивании (150-250 об/мин.) Для удаления клеточных остатков и внеклеточных наночастиц суспензии центрифугировали (7000 об/мин в течение 10 мин.) с использованием центрифуги Eppendorf 5810R. Полученная биомасса представляла собой клетки, капсулированные наночастицами железа и оксида железа (клетки, ассоциированные с наночастицами оксидов железа).

Для снижения уровня метаболической активности клеток использовались следующие варианты пробоподготовки, тормозящей или полностью останавливающей метаболизм микробных клеток [63, 64]:

- снижение температуры растущей культуры микроорганизмов существенно ниже оптимального уровня;

- внесение в растущие культуры микроорганизмов тех или иных биоцидных соединений, в концентрации, обеспечивающей выживание 10-20% клеток (использовались антибиотики, обладающие известными специфическими биоцидными действиями- подавлением синтеза белка, подавлением биосинтеза ключевых соединений-интермедиатов метаболизма, подавлением энергетического метаболизма);

- перенесение растущей культуры микроорганизмов в новую ростовую среду, лишённую каких-либо соединений, необходимых для полноценного роста клеток (метод, аналогичный методу синхронизации микробных клеток).

Для получения препаратов с биогенными наночастицами металлов биомасса микроорганизмов-продуцентов отделялась от культуральной

жидкости центрифугированием, клетки разрушались с использованием гомогенизатора FastPrep-24 5G в течение 2 минут с кварцевым песком в специальных пробирках. Затем наночастицы металлов отделялись от продуктов разрушения клеток центрифугированием.

Первым этапом апробации разработанного метода идентификации жидкости являлась способность метода отличить друг от друга два вида бактериальных клеток в одинаковом питательном растворе ЛБ и от питательного раствора ЛБ без клеток. В качестве коллоидных растворов с культуральными средами были выбраны - культура клеток *Rhodococcus sp.* (далее R 5.2.) в своей питательной среде с добавлением 1 мл Fe и культура клеток *Metylobacterium sp.* (далее MB) в своей питательной среде с добавлением 1 мл Fe.

Для решения этой задачи использовали экспериментальный образец, описанный в пункте 1.2 на пьезоэлектрической пластине $128^\circ\text{YX}+\Theta \text{ LiNbO}_3$. [1*]. В данном эксперименте использовали внутреннюю концентрическую окружность пар ВШП ($\lambda = 200$ мкм) экспериментального образца. Измерения вносимых потерь S_{12} проводились в диапазоне частот 15 - 70 МГц в амплитудно-частотном режиме. В данном диапазоне частот в акустических каналах $\Theta = 0^\circ$ и 30° существуют по 7 волн Лэмба в каждом канале, $\Theta = 60^\circ$ 11 волн и $\Theta = 90^\circ$ 13 волн. Объём пробы исследуемых коллоидных образцов составлял 700 мкл. Измерения проводились при температуре 20°C .

Для каждой акустической волны во всех четырёх акустических каналах были получены значения вносимых потерь S_{12} при взаимодействии волн с исследуемыми жидкостями. Для сравнения были проведены измерения с использованием дистиллированной воды. Как и в первой главе, акустическим откликом служило изменение вносимых потерь $\Delta S_{12} = |S_{12}^{\text{ж-тб}}| - |S_{12}^{\text{H}_2\text{O}}|$. Это позволяло исключить влияние радиационных потерь, связанных с излучением волны в жидкость из-за наличия у нее нормальной компоненты смещения U_3 . В результате, по полученным данным были построены ориентационные гистограммы для коллоидных растворов культуральных

сред, содержащих культуры клеток *Rhodococcus sp.* (красная линия) и *Metylobacterium sp.* (зеленая линия) (рисунок 3.1).

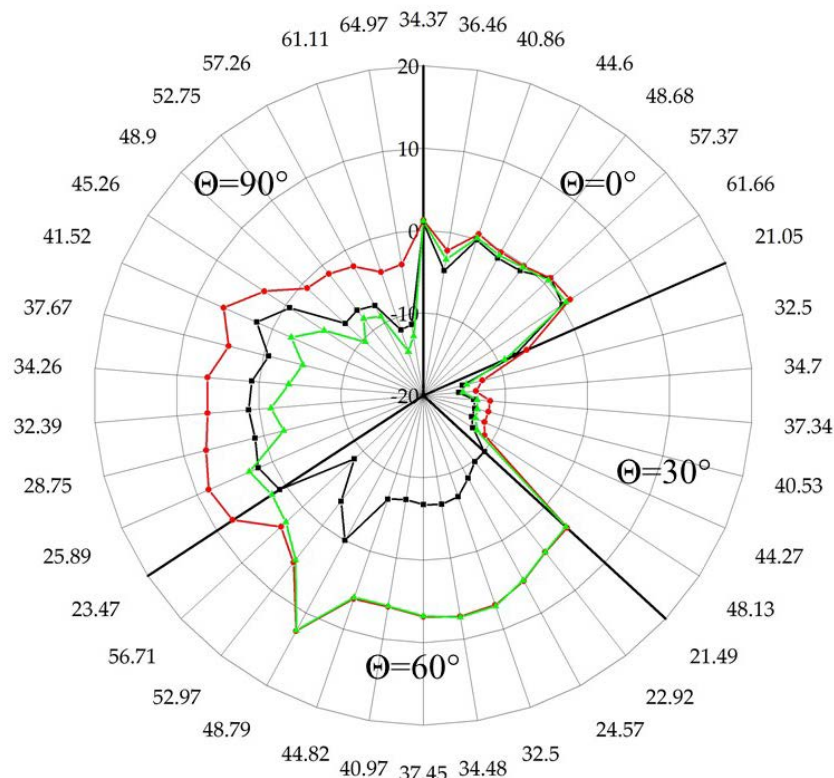


Рисунок 3.1. Ориентационная гистограмма изменения вносимых потерь ΔS_{12} акустических волн в пластине 128YX+ Θ ниобата лития при контакте с культуральными средами с различными клетками. Питательная среда (черная линия), культура клеток *Rhodococcus sp.* (красная линия), культура клеток *Metylobacterium sp.* (зеленая линия). По углу гистограммы отложена частота акустической моды в МГц, по радиусу отложено ΔS_{12} .

Расчет площадей полученных гистограмм (таблица 3.1) производили по формуле 1.14 из пункта 1.2 [2*]. По полученным значениям площадей возможно оценить совокупность влияния исследуемой жидкости на все акустические волны Лэмба при данной геометрии и идентифицировать жидкость по сенсорной гистограмме.

Таблица 3.1. Площади ориентационных гистограмм для культуральных сред.

| Питательная среда | <i>Rhodococcus sp</i> | <i>Metylobacterium sp</i> |
|-------------------|-----------------------|---------------------------|
| 727.3 | 1469.5 | 1097.3 |

Как видно из рисунка 3.1 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 $\theta = 60^\circ$ культуральные среды с клетками *Rhodococcus sp.* (грамположительные бактерии) и *Metylobacterium sp.* (грамотрицательные бактерии) в одинаковой степени увеличивают S_{12} , а вот питательная среда ЛБ, наоборот, их уменьшает.

Различие всех трех жидкостей сильно заметно 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 ЛБ, которая содержит бычий альбумин и железо (в форме цитрата или хлорида), может стимулировать биосинтез капсульных полисахаридов у грамположительных бактерий, что приводит к увеличению вязкости коллоидного раствора. Этот эффект практически не наблюдается для грамотрицательных бактерий [168]. Именно эту тенденцию мы наблюдаем в эксперименте.

3.2 Влияние вязкой суспензии на свойства акустических волн различных типов в пьезоэлектрических пластинах в зависимости от их анизотропии

В данном разделе диссертации приведены результаты исследования возможности применения разработанного многомодового многопараметрического акустоэлектронного устройства для идентификации вязких сред на основе силиконового масла с микрочастицами металлов и их оксидов. Для этого были изготовлены два коллоидных раствора на основе силиконового масла марки ПФМС-2/5л с добавлением 1% массы микрочастиц Fe и Fe₃O₄.

Частицы Fe и Fe₃O₄ (заявленный производителем размер частиц 5-10 мкм) размалывали с помощью планетарной мельницы Fritsch PULVERISETTE 7 (Германия) мелющими шарами из карбида вольфрама диаметров 5 мм сухим помолем в течении 180 минут. Оценку размера

полученных частиц железа и его оксида производили с помощью анализатора размеров частиц Photocor Compact-Z методом динамического рассеивания света. Полученные результаты оценки изображены на рисунке 3.2. С помощью лабораторных аналитических весов CAS CAUW-220D основанных на электромагнитной компенсации были измерены массы помолотых порошков. Далее порошки добавляли и диспергировали в силиконовое масло [169].

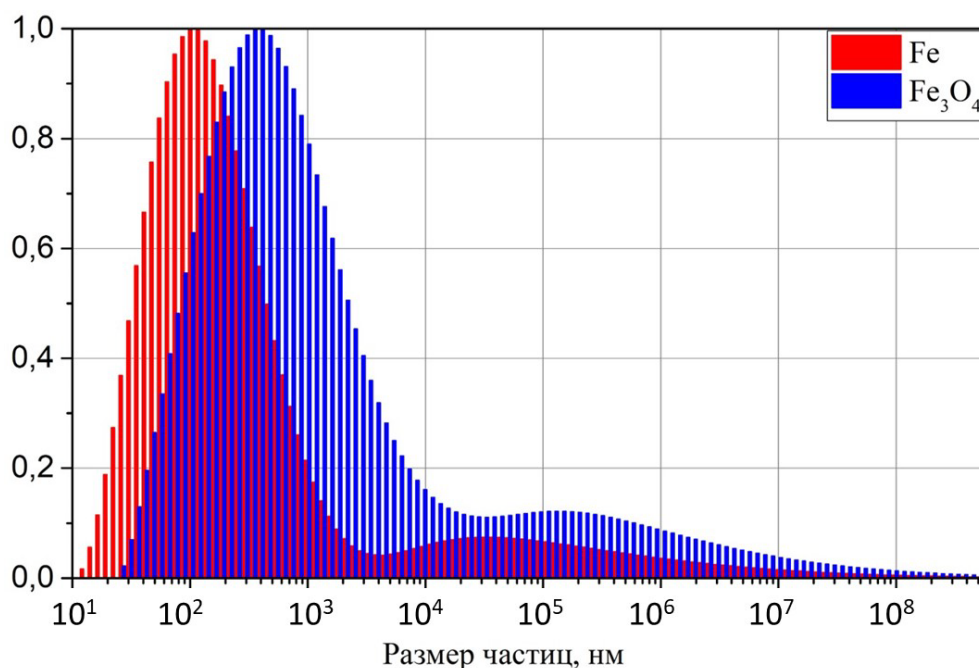


Рисунок 3.2. Оценка размера частиц порошков Fe и Fe₃O₄ с помощью Photocor Compact-Z.

Были измерены вносимые потери S_{12} для акустических волн во всех каналах в присутствии на поверхности пластины силиконового масла без добавок, силиконового масла с 1% массы Fe и силиконового масла с 1% массы Fe₃O₄. Как и в предыдущих главах для того, чтобы исключить вклад радиационных потерь использовалось изменение вносимых потерь относительно дистиллированной воды, т.е. $\Delta S_{12} = |S_{12}^{\text{масло}}| - |S_{12}^{H_2O}|$. Полученные ориентационные гистограммы представлены на рисунке 3.3.

Видно, что практически для всех направлений распространения и рабочих частот акустических волн разница в акустическом отклике для масла, содержащего микрочастицы Fe (красная линия) и микрочастицы Fe₃O₄

(зеленая линия) очень мала. В то же время, можно отметить, что в секторе $\Theta+60^\circ$ видна существенная разница между откликом на чистое силиконовое масло и масло, загрязненное микрочастицами Fe и Fe_3O_4 .

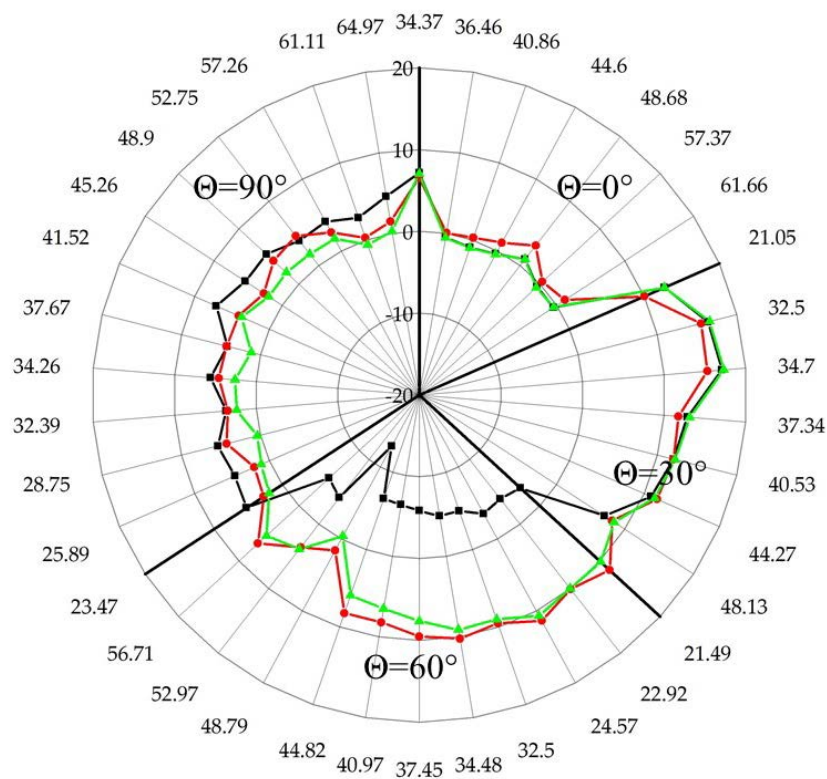


Рисунок 3.3. Ориентационные гистограммы изменения вносимых потерь ΔS_{12} акустических волн в пластине 128YX+ Θ ниобата лития при контакте с вязкими средами. Силиконовое масло (черная линия), силиконовое масло + 1% массы Fe (красная линия), силиконовое масло + 1% массы Fe_3O_4 (зеленая линия). По углу гистограммы отложена частота акустической моды в МГц, по радиусу отложено ΔS_{12} .

Как и в предыдущем разделе по формуле 1.14 из пункта 1.2 был проведен расчет площадей полученных гистограмм (таблица 3.2).

Таблица 3.2. Площади ориентационных гистограмм для вязких сред.

| Силиконовое масло ПФМС-2/5л | Силиконовое масло с добавлением 1% масс Fe | Силиконовое масло с добавлением 1% масс Fe_3O_4 |
|--------------------------------|--|---|
| 1700,4 | 2166,9 | 2043 |

Как видно из таблицы 3.2. площади гистограммы коллоидных растворов близки по значению и подобны по форме, в отличие от чистого силиконового масла. В канале $\Theta = 60^\circ$ оба коллоидных раствора увеличивают затухание волн Лэмба в почти равной степени (порядка 10 дБ). А масло без добавок, наоборот, уменьшает затухание.

3.3. Выводы к главе 3

Показана возможность идентификации культуральных сред, содержащих различные виды аэробных бактерий с помощью многомодового многопараметрического акустоэлектронного устройства [1*]. Результаты получены на примере культуральных сред, содержащих грамположительные бактерии *Rhodococcus sp.* и грамотрицательные бактерии *Metilobacterium sp.*

На примере силиконового масла с нано- и микрочастицами Fe и Fe₃O₄ показана возможность использования многомодового многопараметрического акустоэлектронного устройства [1*] для контроля чистоты вязких жидкостей, в том числе машинных масел.

Глава 4. Экспериментальное исследование влияния дистиллированной воды на радиационные потери акустических волн Лэмба высших порядков в анизотропных пьезоэлектрических пластинах

Как показано в предыдущих главах, при исследовании влияния физических свойств различных жидкостей на характеристики акустических волн Лэмба, всегда присутствуют радиационные потери, которые обусловлены излучением продольной объемной волны в жидкость. Как уже было сказано в введении, известно, что в зависимости от контактирующей жидкости существуют несколько механизмов формирования радиационных потерь [141-143]. А именно, волноводный, связанный с тем, что скорость волны в пластине больше скорости продольной объемной акустической волны в жидкости, и излучательный, связанный с большим значением компоненты нормального смещения U_3 , по сравнению с U_1 , U_2 для волны, распространяющейся в пластине. В данной главе рассмотрены вклады этих механизмов в затухание акустических волн Лэмба высших порядков в различных анизотропных пьезоэлектрических пластинах.

4.1 Анизотропия радиационных потерь акустических волн Лэмба высших порядков в различных пьезоэлектрических пластинах при контакте с дистиллированной водой

Для проведения экспериментальных исследований влияния жидкости на радиационные потери волн Лэмба нулевого и высших порядков использовались линии задержки на основе промышленно выпускаемых пластин LiTaO_3 поворотного 64°Y -среза (углы Эйлера 0° , -26° , 0°), поворотного 36°Y -среза (0° , -54° , 0°) и YZ -среза (0° , 90° , 90°), пластин LiNbO_3 поворотного 128°Y -среза (0° , 37.86° , $\Theta = 30^\circ$ и 90°), пластин YZ-LiNbO_3 (0° , 90° , $\Theta = 90^\circ$ и 120°) и пластин ST -кварца (0° , 132.75° , 0°) [5*,6*].

Толщина использованных пластин составляла $h = 350$ или 500 мкм. Все пластины имели одну шлифованную (верхняя) и одну полированную

(нижняя) поверхности. На полированной поверхности (оптический класс 14, горизонтальные и вертикальные неровности 0.01 и 0.05 мкм, соответственно) располагались входной и выходной встречно-штыревые преобразователи (ВШП), период которых составлял $\lambda = 200, 300$ или 400 мкм. Преобразователи имели по 40 пар электродов из Cr (100 нм) и Al (1200 нм), что обеспечивало их узкую полосу пропускания (2.5 %) и хорошее частотное разрешение соседних акустических мод с близкими скоростями V_{ϕ} .

На шлифованной поверхности (оптический класс 10, горизонтальные и вертикальные неровности 0.16 и 0.8 мкм, соответственно) располагалась жидкостная кювета из тефлона с объемом 500 мкл, ширина которой превышала апертуру акустического пучка, что снижало влияние ее стенок и склейки на распространение акустического пучка. В качестве склейки для кюветы использовался салол. Длина кюветы соответствовала длине пробега волны от начала одного до начала другого преобразователя и составляла $L = 8, 11$ и 14 мм при $\lambda = 200, 300$ и 400 мкм, соответственно (рис.4.1) [4*].

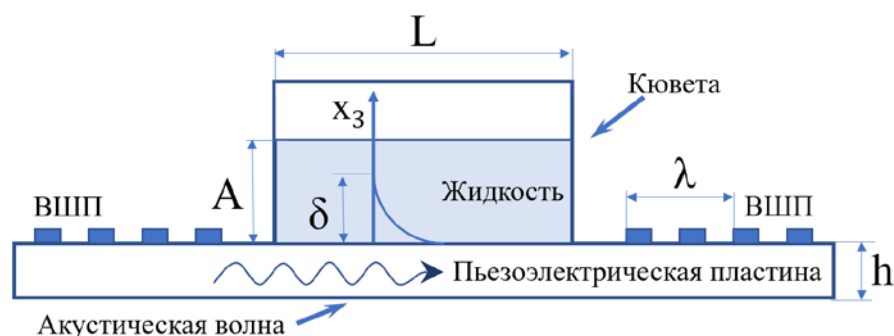


Рис.4.1. Схематическое изображение экспериментального образца, содержащего пьезоэлектрическую пластину, встречно-штыревые преобразователи (ВШП), кювету для тестируемой жидкости. L – длина кюветы, δ – глубина проникновения волны в жидкость, A – высота жидкостного слоя, λ – длина волны, равная периоду ВШП.

Для исследования анизотропии радиационных потерь использовались многоканальные экспериментальные образцы, в которых волны Лэмба высших порядков возбуждались в разных направлениях одной кристаллографической плоскости пластины (п. 1.2 данной диссертации) [1*].

При исследовании радиационных потерь в качестве тестируемой жидкости использовалась дистиллированная вода, которая как обладает малой вязкостью (1.003 сПуаз), малой электропроводностью (менее 0.0005 Сим/м) и большой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon/\epsilon_0 = 79.3$). Это позволяло минимизировать нежелательные вклады в радиационные потери от других механизмов поглощения, таких как вязкоупругие и акустоэлектронные потери, связанные с вязкостью и электропроводностью жидкости, соответственно.

На наших частотах глубина проникновения волн Лэмба в воду δ составляла около 0.1 мкм [158]. Скорость продольной объемной акустической волны в воде (1500 м/с) была в несколько раз меньше скорости волн Лэмба высших порядков в пластине, что существенно усиливало волноводный эффект для всех исследуемых волн в пластине.

Измерения проводились с помощью анализатора четырехполосников KEYSIGHT E5061B, который работал в амплитудно-частотном режиме и измерял частотные зависимости вносимых потерь $S_{21}(f)$ волн различных порядков на соответствующих частотах $f = V_\phi/\lambda$. Измерения проводились при комнатной температуре и нормальном давлении.

Вначале частотная зависимость вносимых потерь $S_{21}(f)$ измерялась без жидкости (на воздухе), а затем в присутствии в кювете дистиллированной воды. Использование для анализа изменения вносимых потерь $\Delta S_{12} = |S_{12}^{H_2O}| - |S_{12}^{\text{воздух}}|$ исключало влияние потерь в преобразователях и служило мерой именно радиационных потерь. Точность измерения потерь составляла ± 1 дБ (± 0.1 дБ/мм).

Измеренные значения ΔS_{21} сопоставлялись со скоростями V_ϕ и с тремя упругими смещениями $\{U_1^T, U_2^T, U_3^T\}$ соответствующих мод на поверхности пластины, которые рассчитывались численно с помощью программы [170] и материальными постоянными для использованных сред, взятых из [3]. Как обычно, сдвигово-горизонтальные U_2 в плоскости пластины и нормальные к плоскости пластины U_3 компоненты смещения частиц нормировались на

величину продольной компоненты смещения U_1 на поверхности пластины. Идентификация мод осуществлялась по совпадению расчетного V^T и экспериментального V_ϕ значений фазовых скоростей.

Сопоставление проводилось для экстремальных комбинаций: малые скорости V_ϕ - большие смещения U_3 ; большие скорости V_ϕ - малые смещения U_3 , то есть рассматривались ситуации, когда доминирующим должен был оказаться один из двух механизмов затухания – волноводный или излучательный.

В результате проведения экспериментальных исследований были получены частотные зависимости вносимых потерь S_{12} для различных срезов и направлений распространения акустических волн Лэмба в пластинах танталата и ниобата лития и кварца.

На рисунке 4.2 представлена ориентационная гистограмма изменения вносимых потерь $\Delta S_{12} = |S_{12}^{H_2O}| - |S_{12}^{воздух}|$ для волн Лэмба высших порядков в пластине $128^\circ Y + \Theta$ LiNbO₃ с толщиной $h/\lambda = 2.5$. На данной гистограмме по углу отложена частота акустической моды, а по радиусу – величина изменения вносимых потерь ΔS_{12} в дБ. На ряде участков гистограммы радиационные потери (рис.4.2) увеличиваются одновременно с ростом скорости V_ϕ и с ростом ее нормального смещения U_3 моды (таблица 4.1). Поэтому разделить волноводный и излучательный эффекты на этих участках гистограммы не представляется возможным. Но так происходит далеко не всегда.

Таблица 4.1. Радиационные потери волн Лэмба в одном из акустических каналов (пластина $128^\circ YX$ LiNbO₃, $h/\lambda = 2.5$).

| | V_ϕ , м/с | f , МГц | U_1^T | U_2^T | U_3^T | ΔS_{12} , дБ |
|--------------------|----------------|-----------|---------|---------|---------|----------------------|
| $\Theta = 0^\circ$ | 4600 | 23 | 1 | 0,071 | 0.013 | 0.66 |
| | 4900 | 24.5 | 1 | 6.3 | 3.6 | 1.92 |
| | 5400 | 27 | 1 | 1.6 | 9.4 | 6.18 |

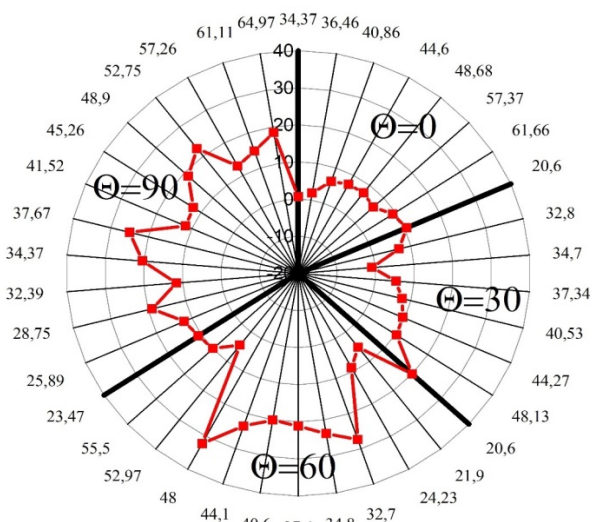


Рисунок 4.2. Ориентационная гистограммы радиационных потерь в присутствии дистиллированной воды, измеренная в 4-х акустических каналах пластины $128^\circ\text{Y}+\Theta \text{ LiNbO}_3$ с толщиной $h/\lambda = 2.5$. По углу отложена частота акустической моды в МГц, по радиусу отложено значение ΔS_{12} .

Иная картина наблюдается в пластине кварца, первые две моды которой проявляют волноводный эффект (таблица 4.2), т.е. при равенстве компонент смещения U_3 и, следовательно, равенстве излучательного механизма радиационных потерь мода с большей скоростью (3500 м/с) обладает большими радиационными потерями (19 дБ), чем мода с меньшей скоростью (3100 м/с и 15.5 дБ, соответственно).

Таблица 4.2. Акустические моды с большими и малыми радиационными потерями в пластине ST, X SiO_2 .

| Материал | h/λ | f , МГц | V_ϕ , м/с | $V_\phi / V_\text{ж}$ | ΔS_{12} , дБ ($\Delta S_{12}/L$, дБ/мм) | $\{U_1^T, U_2^T, U_3^T\}$ |
|--------------------------|-------------|--------------|----------------|-----------------------|--|---------------------------|
| ST, X- SiO_2 | 1.67 | 10.38 | 3100 | 2.07 | 15.5 (1.4) | 1; 0.25; 1.5 |
| | | 11.66 | 3500 | 2.33 | 19 (1.7) | 1; 0.2; 1.5 |
| | | 33.06 | 9 900 | 6.6 | 0 (0) | 1; 1.5; 0.17 |
| | | 36.22 | 10 900 | 7.3 | 2 (0.18) | 1; 2.1; 0.042 |
| | | 42.91 | 12 900 | 8.6 | 0.2 (0.018) | 1; 7.7; 1.1 |

С другой стороны, в той же пластине наблюдаются низкоскоростные моды с большой нормальной компонентой U_3 и большими радиационными потерями ΔS_{21} и высокоскоростные моды с малыми U_3 и малыми радиационными потерями ΔS_{21} (таблица 4.2, рис. 4.3) [5*]. Это означает, что большим U_3 соответствуют большие радиационные потери даже при малых скоростях, а малым U_3 соответствуют малые радиационные потери даже при больших скоростях. Это говорит о доминирующей роли нормального смещения U_3 в формировании радиационных потерь этих мод.

Аналогичная картина наблюдалась и в пластинах других материалов, ориентаций и толщин (рис. 4.4, таблицы 4.3, 4.4). Здесь также обнаружены низкоскоростные сильно излучающие моды и высокоскоростные слабо излучающие моды. Например, в пластине $36^\circ\text{YX-LiTaO}_3$ толщиной $h/\lambda = 1.67$ у моды с низкой скоростью 4150 м/с и большой нормальной компонентой 1.8 радиационные потери составили 33 дБ, а у моды с высокой скоростью 5578 м/с, но малой нормальной компонентой 0.048 они равнялись всего 3 дБ.

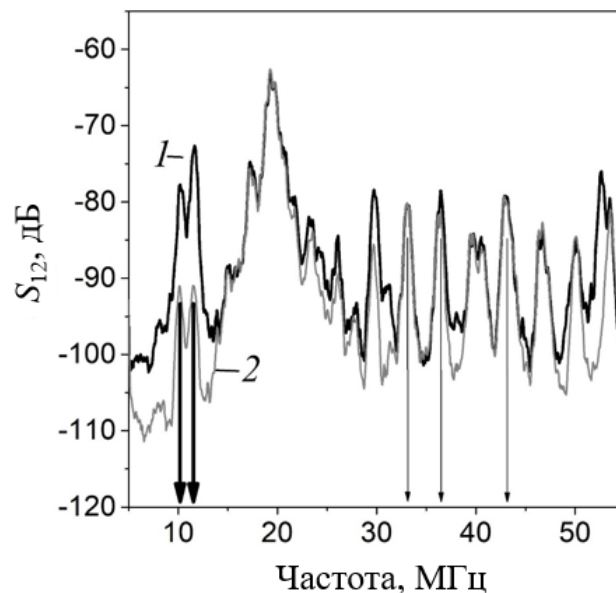


Рисунок 4.3. Частотная зависимость вносимых потерь волн Лэмба разных порядков в пластине ST, X-SiO₂ толщиной $h/\lambda = 1.67$ [5*]. 1 – вносимые потери без жидкости, 2 – вносимые потери с дистиллированной водой. Толстыми и тонкими стрелками указаны моды с большими и малыми радиационными потерями, соответственно.

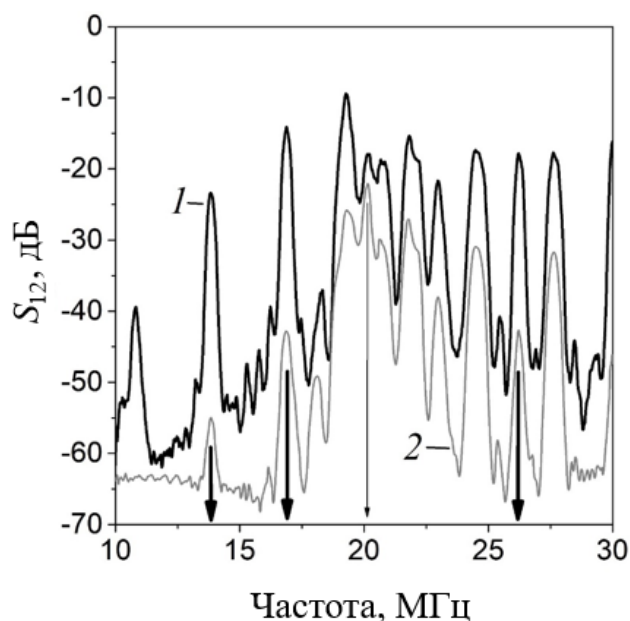


Рисунок 4.4. Частотная зависимость вносимых потерь волн Лэмба разных порядков в пластине $36^\circ\text{YX-LiTaO}_3$ толщиной $h/\lambda = 1.67$ [5*]. 1 – вносимые потери без жидкости, 2 – вносимые потери с дистиллированной водой. Толстыми стрелками указаны моды с большими радиационными потерями, тонкими – моды с малыми радиационными потерями.

Таблица 4.3. Акустические моды с большими и малыми радиационными потерями в пластине $36^\circ\text{YX-LiTaO}_3$ толщиной $h/\lambda = 1.67$.

| Материал | h/λ | f , МГц | V_ϕ , м/с | $V_\phi/V_{\text{жс}}$ | ΔS_{12} , дБ ($\Delta S_{12}/L$, дБ/мм) | $\{U_1^T, U_2^T, U_3^T\}$ |
|-----------------------------|-------------|--------------|----------------|------------------------|--|---------------------------|
| $36^\circ\text{YX-LiTaO}_3$ | 1.67 | 10.83 | 3250 | 2.17 | 24 (2.2) | 1; 0.07; 1.5 |
| | | 13.84 | 4150 | 2.77 | 33 (3) | 1; 0.98; 1.8 |
| | | 16.88 | 5060 | 3.37 | 30 (2.7) | 1; 12; 9 |
| | | 20 | 5578 | 3.72 | 3 (0.1) | 1; 0.17; 0.048 |
| | | 26.21 | 7860 | 5.25 | 25 (2.3) | 1; 0.34; 0.91 |

Наконец, мод с большими U_3 , но малыми потерями ΔS_{21} и мод с малыми U_3 , но большими потерями ΔS_{21} не было обнаружено ни при каких соотношениях скоростей $V_\phi/V_{\text{жс}}$ ни в одном исследованном образце. Это также говорило в пользу доминирующего вклада излучательного механизма в формирование радиационных потерь.

Таблица 4.4. Радиационными потерями в разных экспериментальных образцах.

| Материал | h/λ | f , МГц | V_ϕ , м/с | $V_\phi/V_{жс}$ | ΔS_{12} , дБ ($\Delta S_{12}/L$, дБ/мм) | $\{U_1^T, U_2^T, U_3^T\}$ |
|-------------------------------|-------------|-----------|-------------------|-----------------|--|---------------------------|
| 64°YX-LiTaO ₃ | 0.875 | 10.64 | 2130 | 1.42 | 20 (1.4) | 1; 0.8; 1.7 |
| YZ-LiNbO ₃ | 1.67 | 11.2 | 3360 | 2.25 | 21 (1.9) | 1; 0; 1.5 |
| YZ-LiNbO ₃ | 1.75 | 16.97 | 3400 | 2.27 | 32 (4) | 1; 0; 1.6 |
| | | 54.9 | 10100 | 6.75 | 20.5 (2.6) | 1; 0; 0.91 |
| 128°YX+90°-LiNbO ₃ | 2.5 | 25.8 | 5160 | 3.44 | 20.5 (2.6) | 1; 21; 11 |
| | | 29.18 | 5850 | 3.9 | 22 (2.75) | 1; 24; 18 |
| YZ -LiTaO ₃ | 2.5 | 56.67 | 11350 | 7.57 | 22 (2.75) | 1; 0; 2.2 |

Таким образом, величина радиационных потерь тесно связана с поляризаций волн Лэмба. Если эллипс смещений волны лежит в плоскости пластины, то мода является слабо излучающей. Напротив, если эллипс смещений вытянут вдоль нормали (например, мода частотой 16.97 МГц в пластине YZ-LiNbO₃ толщиной $h/\lambda = 1.75$ в таблице 4.4), то мода становится сильно излучающей. В частности, сильно излучающими являются волны Лэмба с $U_1 \ll U_2, U_3$, для которых эллипс упругих смещений перпендикулярен сагиттальной плоскости и поверхностям пластины (таблица 4.4, пластина 128°YX+90°-LiNbO₃ толщиной $h/\lambda = 2.5$).

4.2. Выводы к главе 4

Изменение вносимых потерь ΔS_{12} высокоскоростных волн Лэмба в анизотропной пьезоэлектрической пластине, контактирующей с дистиллированной водой, зависит от нормальной компоненты смещения U_3 на поверхности пластины. Эта зависимость прослеживается всех типов акустических волн в различных анизотропных пьезоэлектрических пластинах при разных толщинах [5*, 6*].

Благодаря зависимости от U_3 изменение вносимых потерь ΔS_{12} с увеличением частоты мод приобретает немонотонный характер, а диапазон изменений колеблется от 0 до 4 дБ/мм, в своем верхнем пределе приближаясь к значению радиационных потерь для поверхностных акустических волн в тех же материалах [5*, 6*].

Поляризация мод, сильно излучающих в жидкость, представляет собой эллипс, сильно вытянутый вдоль компоненты U_3 . У большинства мод плоскость эллипса близка к сагиттальной плоскости, но у части из них она почти перпендикулярна этой плоскости и поверхностям пластины. Моды с такой поляризацией являются новой модификацией волн Лэмба [5*, 6*].

Заключение

В результате выполнения диссертационной работы были получены следующие основные результаты:

Теоретически показано, что влияние различных слабвязких жидкостей на различные акустические моды в анизотропных пьезоэлектрических пластинах 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, но и их поляризацией [1*].

В случае слабопроводящих жидкостей типа водных растворов глюкозы, полыни или глутамата натрия важную роль играет различие их диэлектрических проницаемостей. Однако, коэффициент электромеханической связи используемых волн играет здесь гораздо меньшую роль, чем их механическая поляризация. В целом, следует отметить, что для дальнейшей разработки многопараметрического акустического датчика вкуса необходимо использовать более анизотропную пластину, например, X срез ниобата лития, и проводить более целенаправленный теоретический поиск мод, селективно реагирующих на механические и электрические параметры жидкости [1*].

Экспериментально показано, что ориентационные гистограммы изменения вносимых потерь $\Delta S_{12} = |S_{12}^{ж-тб}| - |S_{12}^{H_2O}|$ для различных типов акустических волн в сильно анизотропных пьезоэлектрических пластинах, находящихся в контакте со слабвязкими 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. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают выводы теории [1*-3*].

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 [4*].

Показано, что волны, имеющие большую компоненту U_2 , характеризуются меньшей чувствительностью к фазовому переходу, чем волны с наибольшими компонентами U_1 или U_3 . Например, волны в $Y, X+30^\circ$ -LiNbO₃ при $f = 40.53$ МГц, и в $Y, X+60^\circ$ -LiNbO₃, при $f = 56.5$ МГц, являются, соответственно, наиболее и наименее чувствительными к фазовому переходу. При этом их поляризации $\{U_1, U_2, U_3\}$ имеют вид $\{1, 0.4, 0.4\}$ и $\{1, 3.2, 0.8\}$, соответственно. Таким образом, при проектировании устройств для детекции фазового перехода вода/лед можно рекомендовать использовать акустические волны с максимальными компонентами U_1 и U_3 [4*].

Экспериментально обнаружены необычные комбинации материал пластины/толщина, материал пластины/направление распространения, для которых образование льда приводит к полному поглощению всех волн за исключением одной [4*].

Обнаружены волны, для которых вносимые потери S_{12} при образовании льда уменьшаются, что соответствует уменьшению амплитуды акустического сигнала и отрицательному значению отклика ΔS_{12} . Теоретический анализ этой ситуации показал, что в ненагруженной пластине рабочая частота этой волны $f = 19.8$ МГц, фазовая скорость $v = 6952$ м/с, $k^2 = 4.6\%$, упругая поляризация $\{1, 11, 2\}$, т.е. данная волна является квази-поперечной. При нагрузке пластины дистиллированной водой данная волна исчезает (что необычно при такой поляризации), а при образовании льда она снова появляется (как показал эксперимент). Скорость этой волны близка к таковой без нагрузки (6951 м/с), а упругая поляризация по-прежнему соответствует квазипоперечной волне [4*].

Показана возможность идентификации культуральных сред, содержащих различные виды аэробных бактерий с помощью многомодового многопараметрического акустоэлектронного устройства [1*]. Результаты получены на примере культуральных сред, содержащих грамположительные бактерии *Rhodococcus sp.* и грамотрицательные бактерии *Metabolobacterium sp.*

На примере силиконового масла с нано- и микрочастицами Fe и Fe₃O₄ показана возможность использования многомодового многопараметрического акустоэлектронного устройства [1*] для контроля чистоты вязких жидкостей, в том числе машинных масел.

Изменение вносимых потерь ΔS_{12} высокоскоростных волн Лэмба в анизотропной пьезоэлектрической пластине, контактирующей с дистиллированной водой, зависит от нормальной компоненты смещения U_3 на поверхности пластины. Эта зависимость прослеживается всех типов акустических волн в различных анизотропных пьезоэлектрических пластинах при разных толщинах [5*, 6*].

Благодаря зависимости от U_3 изменение вносимых потерь ΔS_{12} с увеличением частоты мод приобретает немонотонный характер, а диапазон изменений колеблется от 0 до 4 дБ/мм, в своем верхнем пределе приближаясь к значению радиационных потерь для поверхностных акустических волн в тех же материалах [5*, 6*].

Поляризация мод, сильно излучающих в жидкость, представляет собой эллипс, сильно вытянутый вдоль компоненты U_3 . У большинства мод плоскость эллипса близка к сагиттальной плоскости, но у части из них она почти перпендикулярна этой плоскости и поверхностям пластины. Моды с такой поляризацией являются новой модификацией волн Лэмба [5*, 6*].

Список литературы

1. Auld B.A. Acoustic fields and waves in solids // 1973/ V. 1. ISBN 0-471-03700-1
2. Галямина И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия // М.: «Советская энциклопедия». 1979. – 400 С., илл.
3. Slobodnik A.J., Conway J.R., Delmonico E.D., Microwave Acoustic Handbook; V.1A. Surface Wave Velocities; Air Force Systems Command: Cambridge, MA, USA, – 1973. – p. 85.
4. Морозов А.И., Проклов В.В., Станковский Б.А. Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств // М.: Радио и связь. –1981.
5. Фильтры на поверхностных акустических волнах/ под ред. Г. Мэттьюза, М.: Радио и связь, 1981.
6. Hickernell F. S. The piezoelectric semiconductor and acoustoelectronic device development in the sixties // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2005. – Т. 52. – №. 5. – С. 737-745.
7. Электроника. Ч.IV. Функциональная электроника // под ред. А.С.Сигова. М.: Юрайт. – 2016.
8. Anisimkin V. I., Voronova N. V., Zemlyanitsyn M. A., Kuznetsova I. E., Pyataikin I. I. Characteristic features of excitation and propagation of acoustic modes in piezoelectric plates // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2013. – Vol. 58. – P. 1004-1010.
9. Anisimkin V. I., Voronova N. V. Features of normal higher-order acoustic wave generation in thin piezoelectric plates // Acoustical Physics. – 2020. – Vol. 66. – P. 1 - 4.
10. Caliendo C., Lo Castro F. Quasi-linear polarized modes in y-rotated piezoelectric GaPO₄ plates // Crystals. – 2014. – Vol. 4. – № 3. – P. 228-240.
11. Chen Z., Fan L., Zhang S. Y., Zhang H. Theoretical research on ultrasonic sensors based on high-order Lamb waves // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 115. – № 20.

12. Wang Y. F., Wang T. T., Liu J. P., Wang Y. S., Laude V. Guiding and splitting Lamb waves in coupled-resonator elastic waveguides // *Composite Structures*. – 2018. – Vol. 206. – P. 588-593.
13. Kuznetsova I. E., Zaitsev B. D., Borodina I. A., Teplykh A. A., Shurygin V. V., Joshi S. G. Investigation of acoustic waves of higher order propagating in plates of lithium niobate // *Ultrasonics*. – 2004. – Vol. 42. – № 1-9. – P. 179-182.
14. Yamanouchi K., Kadosawa F. An electroacoustic surface-wave convolver of fabricated from a thin piezoelectric film and a semiconductor // *Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)*. – 1992. – T. 75. – №. 12. – C. 21-33.
15. Kuznetsova I. E., Anisimkin V. I., Kolesov V. V., Kashin V. V., Osipenko V. A., Gubin S. P., Tkachev E. Verona, S. Sun, Kuznetsova A. S. Sezawa wave acoustic humidity sensor based on graphene oxide sensitive film with enhanced sensitivity // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2018. – Vol. 272. – P. 236-242.
16. Ballantine Jr 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*. – Elsevier, – 1996.
17. Burkov S. I., Zolotova O. P., Sorokin B. P., Turchin P. P., Talismanov V. S. Features of acoustic wave propagation in The Me/ZnO/Me/diamond waveguide structure // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 2018. – T. 143. – №. 1. – P. 16-22.
18. Шаскольская М. П. *Кристаллография* // [Учебник для вузов] — Москва : Высш. школа. – 1976. — 391 с. : ил. : 22 см.
19. Warren P. M. Physical Acoustics and the Properties of Solids. *J. Acoust. Soc. Am.* – 1 November 1956. – 28 (6). – 1197-1206. <https://doi.org/10.1121/1.1908593>
20. Hansman R.J., Kirby M.S. Measurement of ice growth during simulated and natural icing conditions using ultrasonic pulse-echo techniques // *J.Aircr.* – 1986. – 23. – P. 493-498. DOI: 10.1016/j.sna.2024.115839.

21. Vinita Pareek D., Islam S.M., Singh J. Bulk acoustic wave resonators for sensing applications // *Sensors and Actuators: A.* – 2024. – 378. – 115839. DOI: 10.1117/12.276610.
22. Smirnov A., Anisimkin V., Voronova N., Kashin V., Kuznetsova, I. Multi-parameter characterization of liquid-to-ice phase transition using bulk acoustic waves // *Sensors.* – 2024. – 24. – 4010. DOI: 10.3390/s24124010
23. Vetelino K.A., Story P.K., Mileham R.D., Galipeau D.W. Improved dew point measurements based on a SAW sensor // *Sens. and Act. B* – 1996. – 35. – P. 91-98. DOI: 10.1016/S0925-4005(96)02020-5.
24. Galipeau D.W., Story P.K., Vetelino K.A., Mileham R.D. Surface acoustic wave microsensors and applications // *Smart Mater. and Struct.* – 1997. – 6. – P. 658-667. DOI: 10.1088/0964-1726/6/6/002.
25. Varadan V.K., Varadan V.V. IDT, SAW and MEMS sensors for measuring deflection, acceleration and ice detection of aircraft // *Proc. of SPIE.* – 1997. – 3046. – P. 209-219. DOI: 10.1117/12.276610.
26. Балышева О.Л. Акустоэлектронные устройства на поверхностных акустических волнах. Функциональные и конструктивные элементы: учебное пособие // Санкт-Петербург: ГУАП. – 2016. – С. 123.
27. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах // Д. Морган: под ред. С.И. Баскакова; пер. с англ. С.А. Жгуна и М.Ю. Дивногорцева. – М.: Радио и связь. – 1990. – С. 414.
28. Бирюков С.В., Гуляев Ю.В., Крылов В.В., Плесский В.П. Поверхностные акустические волны в неоднородных средах // Москва: Наука. – 1991. – С. 414.
29. Chenlong L., Cancan Y., Shoupei Z., Yuhang W., Anyu H., Wen W., Yong P. Recent progress in flexible surface acoustic wave sensing technologies // *Micromachines.* – 2024. – 15. – 357. DOI: 10.3390/mi15030357.
30. Gao H., Rose J.L. Ice detection and classification on an aircraft wing with ultrasonic shear horizontal guided waves // *IEEE Trans.on Ultras., Ferroel. and Freq. Contr.* – 2009. – 56. – P. 334-343. DOI: 10.1109/TUFFFC.2009.1042.

31. Schulmeyer P., Weihnacht M., Schmidt H. A Dual-mode surface acoustic wave delay line for the detection of ice on 64°-rotated Y-cut Lithium Niobate // *Sensors*. – 2024. – 24. – 2292. DOI: 10.3390/s24072292
32. Caliendo C., Hmidullah M. Guided acoustic wave sensors for liquid environments // *Journ. of Physics D: Appl. Phys.* – 2019. – 52. – 153001. DOI: 10.1088/1361-6463/aafd0b.
33. Wang W., Yin Y., Jia Y., Liu M., Liang Y., Zhang Y., Lu M. Development of Love wave based device for sensing icing process with fast response // *J. of El. Eng. & Technol.* – 2020. – 15. – 1245-1254. DOI: 10.1007/s42835-020-00411-y.
34. Yin Y., Cheng L., Liang Y., Wang W., Xiao H. Development of Love wave-based ice sensor incorporating a PDMS micro-tank // *IEEE Sensors J.* – 2023. – 23. – 4740-4747. 10.1109/JSEN.2023.3237338
35. Hughes R.S., Martin S.J., Frye J.C., Ricco A.J. Liquid-solid phase transition detection with acoustic plate mode sensors: application to icing of surfaces // *Sens. and Act: A* – 1990. – A21-A23. – P. 693-699. DOI: 10.1016/0924-4247(89)80060-3.
36. Anisimkin V., Kolesov V., Kuznetsova A., Shamsutdinova E., Kuztensova I. An analysis of the water-to-ice phase transition using acoustic plate waves // *Sensors*. – 2021. – 21. – P. 919. DOI: 10.3390/s21030919.
37. Золотова О. П., Бурков С. И., Сорокин Б. П. Распространение волн Лэмба и SH-волн в пластине пьезоэлектрического кубического кристалла // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Математика и физика*. – 2010. – Т. 3, № 2. – С. 185-204. – EDN LTEXKH.
38. Бурков С. И., Золотова О. П., Сорокин Б. П., Александров К. С. Влияние внешнего электрического поля на характеристики волны Лэмба в пьезоэлектрической пластине // *Акустический журнал*. – 2010. – Т. 56. – № 5. – С. 606-612. – EDN MVNXGT.
39. Sorokin B.P., Yashin D.V., Asafiev N.O., Burkov S.I., Kuznetsov M.S., Luparev N.V., Golovanov A.V. Microwave Surface and Lamb Waves in a Thin

- Diamond Plate: Experimental and Theoretical Investigation // Ultrasonics. – 2025. – 149. – 107575. DOI 10.1016/j.ultras.2025.107575.
40. Anisimkin V.I., Voronova N.V. Integral array of acoustic sensors for micro-liter liquid discrimination // Bulletin of The Russian Academy of Sciences: Physics. – 2017. – 81. – P. 911-914. 10.3103/S106287381708007X
41. Анисимкин В.И., Максимов С.А., Пенза М., Васанелли Л. Термокондуктометрическое детектирование газов и газовых потоков с помощью линий задержки на поверхностных акустических волнах // Журнал технической физики. – 1997. – Т. 67. – № 5. – С. 119-123.
42. Кислицын В.О., Карапетьян Г.Я., Катаев В.Ф., Середин Б.М., Ермолаева Н.В. Датчик температуры на поверхностных акустических волнах на основе линии задержки и резонатора // Вестник НИЯУ МИФИ. – 2022. – Т. 11(6). – С. 450-456. – <https://doi.org/10.26583/vestnik.2022.241>
43. Никонова Г. С., Никонов И.В. Анализ эквивалентной добротности линии задержки на поверхностных акустических волнах // Техника радиосвязи. – 2016. – № 1(28). – С. 102-107. – EDN VUDOIX.
44. Джоши С.Г., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е. SH акустические волны в пластине ниобата лития и влияние электрических граничных условий на их свойства // Акустический журнал. – 2001. – Т. – 47. – № 3. – С. 336-340.
45. 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. – P. 2727-2737. – 10.3390/s22072727
46. 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.
47. 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.

48. Anisimkin V.I., Voronova N.V., Pucjkov Yu V. General properties of the acoustic plate modes at different temperatures // *Ultrasonics*. – 2015. – 62. – P. 46-49.
49. Бородина И.А., Зайцев Б.Д., Теплых А.А. Влияние жидкости с различной проводимостью, вязкостью и диэлектрической проницаемостью на характеристики щелевой моды в акустической линии задержки // *Ученые записки физического факультета МГУ*. – 2017 (5). – С. 1750401-1750404. ISSN 2307-9665
50. Анисимкин В. И., Воронова Н. В., Галанов Г. Н. Детектирование жидкостей акустическими пластинчатыми модами квазипродольного типа // *Радиотехника и электроника*. – 2010. – Т. 55. – № 9. – С. 1121-1125. – EDN MUYYJF.
51. Ning J., Lei Y., Hu H., Gai C. A comprehensive review of surface acoustic wave-enabled acoustic droplet ejection technology and its applications // *Micromachines*. – 2023. – 14. – 1543. <https://doi.org/10.3390/mi14081543>
52. Agostini M., Cecchini M. Ultra-high-frequency (UHF) surface-acoustic-wave (SAW) microfluidics and biosensors // *Nanotechnology*. – 2021. – 32. – 312001. DOI 10.1088/1361-6528/abfaba
53. Smirnov A., Anisimkin V., Shamsutdinova E., Signore M.-A., Francioso L., Zykov K., Baklaushev V., Kuznetsova I. Acoustic waves in piezoelectric layered structure for selective detection of liquid viscosity // *Sensors*. – 2023. – 23. – 7329. <https://doi.org/10.3390/s23177329>
54. Song S., Zhou J., Riaud A. Effect of viscosity on surface acoustic wave driven collective particle dynamics in sessile droplets: Cloud, cavities, and aggregates // *Physics of Fluids*. – 1 August 2022. – 34 (8). – 083604. <https://doi.org/10.1063/5.0097354>
55. Shamsutdinova E.S., Anisimkin V.I., Fionov A.S., Smirnov A.V., Kolesov V.V., Kuznetsova I. E. Improvement of Methods for Studying The Electrophysical and Viscous Properties of Liquids// *Acoust. Phys.* – 2023. – 69. – P. 87-92.

56. Länge K. Bulk and surface acoustic wave biosensors for milk analysis // Biosensors. – 2022. – V. 12. – №. 8. – P. 602.
57. Ding X., Li P., Lin S. C. S., Stratton Z. S., Nama N., Guo F., Huang T. J. Surface acoustic wave microfluidics // Lab on a Chip. – 2013. – T. 13. – №. 18. – С. 3626-3649.
58. Симаков И.Г., Гулгенов Ч.Ж., Базарова С.Б., Очиров Т.Ч. Поверхностные акустические волны как инструмент исследования диэлектрической релаксации адсорбированной воды // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. – 2022. – Выпуск 2-3. DOI 10.18101/2306-2363-2022-2-3-44-49
59. Симаков И.Г., Гулгенов Ч.Ж., Базарова С.Б. Акустоэлектрический метод определения диэлектрических характеристик жидкости в граничном слое // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2020. – № 1. – С.11-16.
60. Кабаков В. В. Композитные материалы в авиастроении // Наука и бизнес: пути развития. – 2019. – № 8(98). – С. 10-14. – EDN JGUXFH.
61. Широкова С. Ю. Композиты в современном машиностроении // Физика конденсированного состояния и ее приложения : Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции, Стерлитамак, 22–24 сентября 2022 года. – Стерлитамак: Стерлитамакский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Башкирский государственный университет". – 2022. – С. 501-505. – EDN ZSTJPP.
62. Адегова Л.А., Васильев Д. Е., Луговский А. Д. Композиционные материалы в промышленности // Ресурсосбережение и экология: агропромышленный комплекс, проектирование и строительство : сборник научных статей Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров, Курск, 24 ноября 2023 года. – Курск: ЗАО "Университетская книга". – 2023. – С. 108-111. – DOI 10.47581/2023.FM-04.Adegova-Vasilev-01. – EDN JCBMYH.

63. Складнев Д. А., Сорокин В. В., Громова А. С., Гальченко В. Ф. Нанобиотехнологический подход для изучения биопотенциала микробных сообществ водных экосистем Арктики // Материалы Пятой конференции геокриологов России, Москва 14–17 июня 2016 года. Москва: «Университетская книга». – 2016. – С. 244-248. – EDN YOUYNT.
64. Складнев, Д. А., Сорокин В. В., Гальченко В. Ф. Формирование наночастиц серебра в водных пробах из антарктического озера Унтерзее // Микробиология. – 2017. – Т. 86. – № 3. – С. 326-334. – DOI 10.7868/S0026365617030181. EDN YTDOVN.
65. Ванин А. Ф., Телегина В. И., Микоян В. Д., Ткачев Н.А., Васильева С.В. // Цитостатическое действие динитрозильных комплексов железа с глутатионом на клетки *Escherichia coli* определяется катионами нитрозония, высвобождающимися из этих комплексов // Биофизика. – 2022. – Т. 67. – № 5. – С. 938-946. – DOI 10.31857/S0006302922050106. – EDN JIRKIZ.
66. Патент № 2641960 С2 Российская Федерация, МПК G01N 33/48, G01N 33/15, B82B 3/00. Способ обнаружения микробной и вирусной контаминации растворов и биологических жидкостей: № 2013155719: заявл. 16.12.2013: опубл. 23.01.2018 / Д. А. Складнев, В. В. Сорокин, В. В. Кураков. – EDN WOCYQD.
67. Шепелин А. П., Дятлов И. А., Полосенко О. В. // Микробиологический контроль качества пищевой продукции // Бактериология. – 2017. – Т. 2. – № 2. – С. 39-47. – DOI 10.20953/2500-1027-2017-2-39-47. – EDN OSZQBZ.
68. Кечкина Н.И., Попов А.А., Баранова Д.И. Ловдар Ю.А., Кулигина Н.О., Токарев С.В., Наумова Е.Г., Зубков И.Л., Бессонов И.Л., Орлов Е.С. Обзор применения современных систем типа «Электронный нос» для анализа качества пищевых продуктов // Современные наукоемкие технологии. Технические науки. – 2015. – № 2. – С. 77-81.
69. Головкова Д. О., Динер Ю. А. Сенсорная аналитическая система «электронный нос» для анализа качества пищевых продуктов // Наука молодых - будущее России: сборник научных статей 6-й Международной

научной конференции перспективных разработок молодых ученых, Курск, 09–10 декабря 2021 года. Том 4. – Курск: Юго-Западный государственный университет. – 2021. – С. 153-155. – EDN DIFVUA.

70. 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

71. 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.

72. 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. – EDN UGDNVB.

73. Колешко В. М., Дейнак Д. А., Хмурович Н. В. Электронный язык на поверхностных акустических волнах // Теоретическая и прикладная механика: Международный научно-технический сборник. Том Выпуск 21. – Минск: Белорусский национальный технический университет. – 2006. – С. 104-109. – EDN CSQRGX.

74. Кучменко Т.А., Лисицкая Р.П., Шабельский В.С. Применение «электронного носа» на пьезосенсорах для установления фактов фальсификации бензинов с разным октановым числом // Журнал аналитической химии. – 2022. – Т. 77. – № 2. – С. 188-198.

75. Суржигов В. П., Хорсов Н. Н., Хорсов П. Н. Мультисенсорная система для исследования дефектности диэлектрических материалов // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 11. – С. 17-20. – EDN OIQDHY.

76. Козырев И.А. Мультисенсорная система «Электронный нос» для определения качества мясных продуктов в процессе хранения // Пищевые системы. – 2021. – Т. 4. – № 3S. – DOI: <https://doi.org/10/21323/2618-9771-2021-4-3S>
77. Папиева И. С., Кирсанов Д. О., Легин А. В., Карцова Л.А., Алексеева А.В., Власов Ю.Г., Бхаттачария Н., Саркар С., Бандиопадхай Р. Анализ образцов чая с помощью мультисенсорной системы и капиллярного электрофореза // Журнал прикладной химии. – 2011. – Т. 84. – № 6. – С. 940-947. – EDN QFLVJB.
78. Долгополов Н., Яблоков М. Наносенсорная нейроподобная система «Электронный нос» // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2008. – № 1(83). – С. 60-65. – EDN OILMYZ.
79. Шуба А. А., Кучменко Т. А., Умарханов Р. У. Оценка возможности прогноза и регуляции сорбционных свойств композитных покрытий пьезокварцевых сенсоров // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2023. – 23(4). – С. 630-641. – 10.17308/sorpchrom.2023.23/11571
80. Алтухов А. А., Кирилин Н. М., Шустров А. В. Мультисенсорные системы обнаружения и идентификации различных веществ по их запаху // Мир измерений. – 2007. – № 3. – С. 35-37.
81. Hagleitner C., Hierlemann A., Lauge D., Kummer A., Kerness N., Brand O., Baltes H. Smart single-chip gas sensor microsystem // Nature. – 2001. – V. 414. – P. 293-296.
82. Baltes H., Barrettino D., Graf D. Hagleitner C., Hierlemann A. Microsensor and single chip integrated microsensor system // US Patent 2004/0075140. Publ. Apr. 22. 2004
83. Young R.C., Buttner W.J., Linner B.R., Ramesham R. Electronic nose for space program application // Sensors and Actuators B. – 2003. – V. 93. – P. 7-16.
84. Goschnivk J. An electronic nose for intelligent consumer products based on gas analytical gradient microarray // Microelectronic Engineering. – 2001. – V. 57-58. – P. 693-704.

85. Sysoev V.V., Button B.K., Wepsiec K. Towards The nanoscopic «Electronic nose» hydrogen vs carbon monoxide discrimination with an array of individual metal oxide nano- mesowire sensors // Nanoletters. – 2006. – V. 6. – Iss. 8. – P. 1584-1588.
86. Корабель М. Д., Синев И. В., Шикунов Д. А. Клычков Н.А., Тимошенко Д.А., Симаков В.В. Принципы создания виртуальной мультисенсорной системы для распознавания газовых смесей // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – № 12. – С. 827-835. – DOI 10.26456/pcascnn/2020.12.827. – EDN MDPUZE.
87. Кирсанов Д.О., Легин А.В., Бабаин В.А., Меднова О.В., Власов Ю.Г. Новые сенсоры и мультисенсорные системы («Электронный язык») для анализа растворов отработанного ядерного топлива // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2007. – Сер. 4. – Вып. 4. – С. 84-90.
88. Бобрешова О. В., Полуместная К. А., Янкина К. Ю. Паришина К.Ю., Попов В.И. Потенциометрические мультисенсорные системы для определения новокаина и лидокаина в водных растворах, содержащих хлориды калия и натрия // Журнал аналитической химии. – 2012. – Т. 67. – № 12. – С. 1072. – EDN PDDPKD.
89. Бобрешова, О. В., Паршина А. В., Рыжкова Е. А. Потенциометрическая мультисенсорная система для определения лизина в водных растворах с хлоридами калия и натрия // Журнал аналитической химии. – 2010. – Т. 65. – № 72. – С. 885-891. – EDN MTJENH.
90. 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.
91. Зайцев Б. Д., Семенов А. П., Теплых А. А., Бородина И. А. Матрица пьезоэлектрических резонаторов с поперечным электрическим полем с газочувствительными пленками хитозана // СВЧ-техника и

телекоммуникационные технологии. – 2020. – № 1-2. – С. 408-409. – EDN EGGPDB.

92. Анисимкин В. И. Оптимизация интегральной решетки акустоэлектронных газовых датчиков // Радиотехника и электроника. – 2015. – Т. 60. – № 9. – С. 985. – DOI 10.7868/S0033849415090016. – EDN UDEVDX.

93. Shiokawa S., Kondoh J. Surface acoustic waves sensor for liquid-phase applications // IEEE Ultrasonics Symposium Proc. Caesars Tahoe, NV, USA. – 1999. – P.445- 452.

94. Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е. Измерение механических и электрических параметров жидкости // Труды XX сессии РАО, 27-31 октября 2008г., г. Москва. – 2008. – Т.2. – С.64-68.

95. Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Датчик механических и электрических параметров жидкости, Патент РФ на ПИ №73488 от 20.05.2008.

96. Panneerselvam G., Tirumal V., Pandya H.M. Review of surface acoustic wave sensors for the detection and identification of toxic environmental gases/vapours // Arch. Acoust. – 2018. – 43. – P. 357-367.

97. Lange K., Rapp B.E., Rapp M. Surface acoustic wave biosensors: A review // Anal. Bioanal. Chem. – 2008. – 391. – P. 1509-1519.

98. Li X., Sun W., Fu W., Lv H., Zu Z., Guo Y., Gibson D., Fu Y.-Q. Advances in sensing mechanisms and micro/nanostructured sensing layers for surface acoustic wave-based gas sensors // J. Mater. Chem. A. – 2023. – 11. – P. 9216-9238.

99. Wang B., Zhou L., Wang,X. Surface acoustic wave sensor for formaldehyde gas detection using the multi-source spray-deposited graphene/PMMA composite film // Front. Mater. – 2023. – 9. – 1025903.

100. Lim Y.M., Leong A., Yap K.Z., Swamy V., Ramakrishnan N. Deep learning approach to estimate relative humidity contribution in VOC response of LCM-graphene oxide-based VOC sensors // IEEE Sens. J. – 2024. – 24. – P. 9718-9725.

101. Smirnov A., Anisimkin V., Krasnopolskaya L., Guliy O.I., Sinev I., Simakov V., Golyshkin A., Almyasheva N., Ageykin N.A., Kuznetsova I.E. Features of the

formation of sensitive films based on mycelium of higher fungi for surface and plate acoustic waves gas sensors // *Sensors*. – 2023. – 23. – 2216.

102. Zhang Q., Tan L.F., Chen Y.X., Zhang T., Wang W.J., Liu Z., Fu L. Human-like sensing and reflexes of graphene-based films // *Adv. Sci.* – 2016. – 3. – 1600130.

103. Pang J., Peng S., Hou C., Wang X., Wang T., Cao Y., Zhou W., Sun D., Wang K., Rummeli M.H. Cuniberti G., Liu H. Applications of MXenes in human-like sensors and actuators // *Nano Res.* – 2023. – 16. – P. 5767-5795.

104. 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.

105. 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. – EDN YIOBSF.

106. Koch S.W., Araki H., Ehlers J., Hepp K., Kippenhahn R., Weidenmuller H.A., Zittartz J. Dynamics of first-order phase transitions in equilibrium and nonequilibrium systems // *In Lecture Notes in Physics*. Berlin: Springer-Verlag, – 1984.

107. Анисимкин В. И., Воронова Н. В., Галанов Г. Н. Детектирование жидкостей акустическими пластинчатыми модами квазипродольного типа // *Радиотехника и электроника*. – 2010. – Т. 55. – № 9. – С. 1121-1125.

108. Антибас И.Р., Дьяченко А.Г., Саед Бакир Имад Влияние температур жидкости на скорость распространения гидравлической ударной волны в полиэтиленовых трубах // *Advanced Engineering Research*. – 2021. – Т.21. – № 4. – С. 319-327.

109. Эфрос В. В., Лазарев В. М. Влияние температуры охлаждающей жидкости на показатели трехцилиндрового тракторного дизеля // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – № 5. – С. 18-19.
110. Низамова А. Д., Киреев В. Н., Урманчеев С. Ф. О влиянии зависимости вязкости от температуры на устойчивость течения жидкости // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2014. – № 4. – С. 12-16.
111. Тирон Д. В., Уляшева Н. М., Ланина Т. Д. Исследование влияния температуры на реологические свойства различных углеводородных жидкостей // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2016. – № 4. – С. 29-34.
112. Сербин Д.В., Буславе Г.В., Лаврик А.Ю., Кадочников В.Г., Дмитриев А.Н. Исследование взаимодействия заливочных жидкостей и озерной воды при вскрытии подледникового озера Восток в Антарктиде // Записки горного института. – 2025. – Т. 273. – № 16610. – С. 136-146
113. Bing Y., Shun-Le,D. Molecular Dynamical Simulation of Water/Ice Phase Transitions within Carbon Nanotubes under Various Pressures // Chinese Physics Letters. – 2009. – 26. – 086402. – DOI: 10.1088/0256-307X/26/8/086402
114. Matsumoto M., Saito S., Ohmine I. Molecular dynamics simulation of the ice nucleation and growth process leading to water freezing // Nature. – 2002. – 416. – P. 409-413. – DOI:10.1038/416409a
115. Tanaka H., Koga K. Theoretical studies on the structure and dynamics of water, ice, and clarrate hydrate // Bull. of The Chem. Soc.of Jap. – 2006. – 79. – P. 1621-1644. – DOI: 10.1246/bcsj.79.1621.
116. Feistel R., Wagner W. A new equation of state for H₂O ice // Ih. J. of Phys. and Chem. Refer. Data. – 2006. – 35. –P. 1021-1047. – DOI:10.1063/1.2183324 .
117. Chen Z., Berrens M.L., Chan K.-T., Fan Z., Donadio D. Thermodynamics of Water and Ice from a Fast and Scalable First-Principles Neuroevolution Potential // J. of Chem. Eng. Data. – 2024. – 69. – P. 128-140. – DOI: 10.1021/acs.jced.3c00561

118. Wei K., Yang Y., Zuo H., Zhong D. A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine // *Wind Energy*. – 2020. – 23. – P. 433-457. – DOI: 10.1002/we.2427
119. Бежан А. В. Проблема оледенения ветроэнергетических установок // *Энергия: экономика, техника, экология*. – 2008. – № 5. – С. 25-29. – EDN IUDYRH.
120. Sigfusson H., Ziegler G.R., Coupland J.N. Ultrasonic monitoring of food freezing // *J. of Food Eng.* – 2004. – 62. – P. 263-269. – 10.1016/S0260-8774(03)00239-5.
121. Kabardin I., Dvoynishnikov S., Gordienko M., Kakaulin S., Ledovsky V., Gusev G., Zuev V., Okulov V. Optical methods for measuring icing of wind turbine blades // *Energies*. – 2021. – 14. – 6485. – DOI: 10.3390/en14206485
122. Sibilia S., Tari L., Bertocchi F., Chiodini S., Maffucci A. A capacitive ice-sensor based on graphene nano-platelets strips // *Sensors*. – 2023. – 23. – P. 9877. 10.3390/s23249877
123. Bartod C., Prasad M., Bouillot J., Galez C., Farzaneh M. High electric field measurement and ice detection using a safe probe near power installations // *Sens. and Act., A: Phys.* – 2004. – 113. – P. 140-146. – DOI: 10.1016/j.sna.2004.02.007
124. Socorro-Leranoz A.B., Aginaga-Etxamendi K.I., Diaz S., Urrutia A., Villar I.D., Matias I.R. Monitoring of water freeze thaw cycle by means of an etched single mode multimode single mode fiberoptic refractometer // *IEEE Sensors Journal*. – 2023. – 23. – P. 12889 – 12898. – DOI: 10.1109/JSEN.2023.3273226
125. Yardim C., Johnson J.T., Jezek K.C., Andrews M.J., Durand M., Duan Y., Tan S., Tsang L., Brogioni M., MacElloni G., Bringer A. Greenland ice sheet subsurface temperature estimation using ultrawideband microwave radiometry // *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.* – 2022. – 60. – DOI: 10.1109/TGRS.2020.3043954
126. Hansman R.J., Kirby M.S. Measurement of ice growth during simulated and natural icing conditions using ultrasonic pulse-echo techniques // *J. Aircr.* – 1986. – 23. – P. 493-498. – DOI: 10.2514/3.45334.

127. Vetelino K.A., Story P.K., Mileham R.D., Galipeau D.W. Improved dew point measurements based on a SAW sensor // Sens.and Act. B. – 1996. – 35. – P. 91-98. – DOI: 10.1016/S0925-4005(96)02020-5.
128. Anisimkin V., Kolesov V., Kuznetsova A., Shamsutdinov, E., Kuznetsova I. An analysis of the water-to-ice phase transition using acoustic plate waves // Sensors. – 2021. – T. 21. – №. 3. – C. 919. – DOI: 10.3390/s21030919
129. Varadan V.K., Varadan V.V. IDT, SAW and MEMS sensors for measuring deflection, acceleration and ice detection of aircraft // Proc. of SPIE. – 1997. – 3046. – P. 209-219. – DOI: 10.1117/12.276610.
130. Hughes R.S., Martin S.J., Frye J.C., Ricco A.J. Liquid-solid phase transition detection with acoustic plate mode sensors: application to icing of surfaces // Sens. and Act: A. – 1990. – A21-A23. – P. 693-699. – DOI: 10.1016/0924-4247(89)80060-3.
131. Vellekoop M.J., Jakoby B., Bastemeijer J., A Love-wave ice detector. // Proc. IEEE Ultras.Symp. – 1999. – P. 453-456.
132. Jose K.A., Sunil G., Varadan V.K., Varadan V.V. Wireless IDT ice sensor // IEEE MTT-S Int. MW Symp. Digest. – 2002. – 1-3. – P. 655-658. – DOI: 10.1109/MWSYM.2002.1011706.Sensors 2021, 21, x FOR PEER REVIEW 10 of 10
133. Gao H, Rose J.L. Ice detection and classification on an aircraft wing with ultrasonic shear horizontal guided waves // IEEE Trans.onUltras.,Ferroel. and Freq. Contr. – 2009. – 56. – P. 334-343. – DOI: 10.1109/TUFFC.2009.1042.
134. Wang W., Yin Y., Jia Y., Liu M., Liang Y., Zhang Y., Lu M. Development of Love wave based device for sensing icing process with fast response // J. of El. Eng. & Technol. – 2020. – 15. – P. 1245-1254. – DOI: 10.1007/s42835-020-00411-y.
135. Анисимкин В. И., Воронова Н. В., Кузнецова И. Е. , Осипенко В.А., Смирнов А.В. Датчики оледенения на основе акустических волн Лэмба // Сборник Трудов XXXV сессии Российского акустического общества, Москва, 13–17 февраля 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной

ответственностью "Издательство ГЕОС". – 2023. – С. 599-604. – DOI 10.34756/GEOS.2023.17.38503. – EDN WHZTCH.

136. Скрипаль А. В., Пономарев Д. В., Трифонова М. А., Усанов Д. А. Исследование диэлектрических свойств композита вода-лед вблизи точки фазового перехода // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине 2018: Сборник статей Всероссийской школы-семинара, Саратов, 01 октября 2018 года / Под редакцией Д.А. Усанова. – Саратов: Издательство "Саратовский источник". – 2018. – С. 171-173. – EDN VKZIYG.

137. Кряжев А.А., Камашев Д.В. Исследование фазового перехода жидкость – кристалл в растворе KNO_3 с использованием рамановской спектроскопии // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2018. – № 6. – С. 25 – 29. – DOI: 10.19110/2221-1381-2018-6-25-29

138. Белим С.В., Ларионов И.Б. Исследование влияния магнитного поля на фазовый переход в антиферромагнитных пленках методом компьютерного моделирования // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2019. – № 6. – С. 72-75

139. Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е. Акустические волны в тонких пьезоэлектрических пластинах //-М.: Радиотехника. – 2018

140. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Joshi S.G., Teplykh A. Effect of a liquid on the characteristics of antisymmetric lamb waves in thin piezoelectric plates // Acoust. Phys. – 2007. – 53. – P. 557–563.

141. Terakawa Y., Kondoh J. Numerical and experimental study of acoustic wave propagation in glass plate/water/128YX-LiNbO₃ structure //Japanese Journal of Applied Physics. – 2020. – Т. 59. – №. SK. – С. SKKC08.

142. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике // М.: Наука. – 1966.

143. Anisimkin I. V., Anisimkin V. I. Attenuation of acoustic normal modes in piezoelectric plates loaded by viscous liquids // IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. – 2006. – Т. 53. – №. 8. – С. 1487-1492.

144. Hamidullah M., Elie-Caille C., Leblois T. Higher-order Lamb waves with quasi-zero surface displacement components on a GaAs piezoelectric plate // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2022. – V. 55. – No. 9. – P. 094003. – <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac39c5>.
145. Mansoorzare H., Shahraini S., Todi A., Azim N., Khater D., Rajaraman S., Abdolvand R. A Microfluidic MEMS-Microbalance Platform with Minimized Acoustic Radiation in Liquid // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. – 2020. – 67(6). – 8910595. – P. 1210-1218. – 10.1109/TUFFC.2019.2955402.
146. 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 (221). – P. 106496.
147. Holmes B. *Flavor: The science of our most neglected sense*. London: WH Allen. – 2017. – P. 310.
148. Shamsutdinova E.S., Anisimkin V.I., Fionov A.S., Smirnov A.V., Kolesov V.V., Kuznetsova I.E. Improvement of methods for studying the electrophysical viscous properties of liquids // *Acoustical Physics*. – 2023. – 69. – P. 87-92. – 10.1134/S1063771022700531
149. Lide D.R. *Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, Inc., 2000 Corporate Blvd. N. W., Boca Raton, FL 33431
150. Firdaus A.A., Chakraborty N., Juglan K.C. Thermo-acoustical investigation of monosodium glutamate food preservative in an aqueous solution of polyethylene glycols (400 and 600) by using ultrasonic technique // *Chemical Thermodynamics and Thermal Analysis*. – 2024. – 13. – 100127. – 10.1016/j.ctta.2023.100127
151. Mougin P., Wilkinson D., Roberts K.J., Jack R., Kippax P. Sensitivity of particle sizing by ultrasonic attenuation spectroscopy to material properties // *Powder Technol.* – 2003. – 134. – P. 243-248.
152. Weast R.C., Astle M.J. *Chemical Rubber Company Handbook of Chemistry and Physics*, 66th ed; Chemical Rubber: Boca Raton, FL, USA. – 1985. – P. D232, D254.

153. Apelblat A., Manzurola E., Orekhova Z. Electrical conductance studies in aqueous solutions with glutamic ions // J. Solut. Chem. – 2007. – 36. – P. 891-900.
154. Peyman A., Gabriel C., Grant E.H. Complex permittivity of sodium chloride solutions at microwave frequencies // Bioelectromagnetics. – 2007. – 28. – P. 264-274.
155. Yoon G. Dielectric properties of glucose in bulk aqueous solutions: Influence of electrode polarization and modeling // Biosens. Bioelectron. – 2011. – 26. – P. 2347-2353.
156. Routray W., Orsat V. Variation of dielectric properties of aqueous solutions of ethanol and acids at various temperatures with low acid concentration levels // Phys. Chem. Liq. Int. J. – 2014. – 52. – P. 209-232.
157. Bordi F., Cametti C., Paradossi G. A comparative study of the high-frequency dielectric properties of poly (α -Glutamate) and poly (γ -Glutamate) aqueous solutions // Pept. Sci. – 1996. – 40. – P. 485-494.
158. Smirnov A., Anisimkin V., Shamsutdinova E., Signore M.-A., Francioso L., Zykov K., Baklaushev V., Kuznetsova I. Acoustic waves in piezoelectric layered structure for selective detection of liquid viscosity // Sensors. – 2023. – 23. – P. 7329. – 10.3390/s23177329
159. Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G., Borodina I.A. Acoustic waves in piezoelectric plates bordered with viscous and conductive liquid // Ultrasonics. – 2001. – 39. – P. 45-50.
160. Available online: <https://www.bostonpiezooptics.com/lithium-niobate> (accessed on 25 November 2022).
161. Kino G.S., Reeder T. M. A normal mode theory for The Rayleigh wave amplifier //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2005. – T. 18. – №. 10. – C. 909-920.
162. Anisimkin V.I. Anisotropy of the acoustic plate modes in ST-Quartz and 128Y-LiNbO₃ // IEEE Trans. on Ultras., Ferroel., and Freq. Contr. – 2014. – 61. – P. 120-132. – 10.1109/TUFFC.2014.2883.

163. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах // М.: Наука. – 1982. – С. 424.
164. Kovacs G., Anhorn M., Engan H.E., Visiniti G., Ruppel C.C.W. Improved material constants for LiNbO₃ and LiTaO₃ // Proc. IEEE Int. Ultras. Symp. – 1990. – V.1. – P. 435-438.
165. Neumeier J.J. Elastic constants, bulk modulus, and compressibility of H₂O ice Ih for the temperature range 50 K–273 K. J. of Phys. and Chem. Ref. Data. – 2018. – 47. – 033101. – DOI: 10.1063/1.5030640.
166. Beilog'skii V.A., Sekoyan S.S., Samorukova L.M., Stefanov S.R., Levtsov V.I. Pressure dependence of the sound velocity in distilled water // Measurement Techniques. – 1999. – 42. – P. 406-413. – DOI: 10.1007/BF02504405.
167. Gulyaev Y. V. Peculiarities of the Anisimkin Jr.'plate modes in LiNbO₃ and Te single crystals // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. – 2009. – T. 56. – №. 5. – С. 1042-1045.
168. Ashagrie Y. N., Tadesse M. G., Bachheti R. K., Nijhawan G., Tyagi S., Bachheti A. Formulation and characterization of Caesalpinia decapetala seed oil nanoemulsion: physicochemical properties, stability, and antibacterial activity // Scientific Reports. – 2024. – 15(1). – P. 14598.
169. Anisimkin V.I., Voronova N.V., Shamsutdinova E.S., Smirnov A., Datsuk E., Kashin V., Kolesov V., Filippova N., Kotsyurbenko O., Kuznetsova I. Determination of acoustic properties of paraffin oil mixed with activated coal nanoparticles or SPAN80 using only BAW time delay measurement // Sensors and Actuators A: Physical. – 2024. – 379. – 115893. – DOI: 10.1016/j.sna.2024.115893
170. Adler E.L., Slaboszewicz J.K., Farnell G.W., Jen, C.K. PC Software for SAW Propagation in Anisotropic Multilayers // IEEE Trans. on Ultras. Ferroel. Freq. Contr. – 1990. – 37. – P. 215–223.

Список опубликованных работ по теме диссертации

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. – DOI: 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

Ссылки на публикации автора в тексте помечены звездочкой (1*, 2*...).