

На правах рукописи



Шамсутдинова Елизавета Сергеевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ И ИХ
ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ТВЕРДОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ПОМОЩИ
АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Специальность 1.3.8

Физика конденсированного состояния

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2024

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

Научный руководитель: **Кузнецова Ирен Евгеньевна** доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, ФГБУН ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, г. Москва

Официальные оппоненты: **Дамдинов Баир Батуевич** доктор физико-математических наук, доцент, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Петронюк Юлия Степановна кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт биохимической физики имени Н.М.Эмануэля РАН, г. Москва

Ведущая организация: ФГБНУ "Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных материалов" Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Троицк

Защита состоится «21» марта 2025 г. в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.1.111.01 при ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая 11, корп. 7, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН <http://cplire.ru/rus/dissertations/Shamsutdinova/dissertation.pdf>

Автореферат разослан « » _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.111.01,
доктор физико-математических наук
доцент

Кузнецова Ирен Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Развитие технологий привело к появлению широкого спектра новых растворов и суспензий на основе таких жидкостей как вода, глицерин, нефтепродукты, различные масла и т.д. Эти жидкие среды зачастую содержат микро- или наночастицы и представляют собой композитные системы. Их свойства (уровень кислотности [1], электропроводность [2 - 4], мутность [5], содержание растворенного кислорода в растворе [6], чистота [7], вязкость [8], плотность [4] и т.д.) могут существенно влиять на эксплуатационные характеристики двигателей и приборов. Традиционные методы контроля электрических свойств жидкостей (кондуктометрические, емкостные) часто имеют ограниченную применимость, поскольку измерительные электроды контактируют с жидкостью и подвержены быстрому износу. Особенно это касается контакта с агрессивными средами или использования приборов в экстремальных условиях (высокие давления, температуры ниже нуля и т.д.).

Акустические методы исследования позволяют проводить измерения физических свойств жидкостей без их контакта с электродной структурой [9]. Акустические волны (объемные (ОАВ), поверхностные (ПАВ) или волны в пластинах) взаимодействуют с жидкой средой через упругое поле, характеризующееся распределением механических напряжений и деформаций. Изменения свойств жидкости (вязкость, электропроводность, диэлектрическая проницаемость) приводят к изменению фазы и амплитуды акустических волн, что позволяет получать соответствующие калибровочные зависимости для создаваемых устройств.

В настоящее время известны акустические датчики для определения вязкости жидкости, основанные на поперечно-горизонтальных (SH) (ПАВ) и ОАВ [10, 11]. Подобные датчики также используются для исследования дисперсных систем с биологическими объектами [12], наносуспензий [13], различных масел [14], компонентов нефти [15]. Однако, работ, посвященных исследованию взаимодействия акустических волн с неполярными жидкостями и суспензиями на их основе, не так много. Известны исследования акустических волн в неполярных диэлектриках He I и He II [16]. Кроме того, известны работы по исследованию свойств акустических волн, различных типов, распространяющихся в звукопроводах, находящихся в контакте с бензином, машинным или растительным маслами [17], [18]. В результате были предложены соответствующие датчики на волнах в пластинах, резонаторах с продольным возбуждающим полем и на объемных акустических волнах.

Как известно, понижение температуры приводит к фазовому переходу жидкость – лед. Контроль за агрегатным состоянием вещества в этом случае является актуальной практической задачей, связанной с безопасной эксплуатацией различных технических устройств. В настоящее время известны акустические датчики контроля за фазовым переходом вода-лед. Например, ультразвуковой метод использовался для измерения толщины льда [19] и характеристик фазового перехода вода-лед с использованием ПАВ [20] и SH ПАВ [21]. Между тем, использование других типов акустических волн в слоистых структурах и пьезоэлектрических пластинах [22], может позволить разработать более чувствительные методы контроля фазовых переходов жидкость – твердое тело.

Следует отметить, что разработка датчиков как жидкости, так и датчиков для контроля фазовых переходов жидкость – твердое тело, невозможна без предварительного проведения теоретического анализа распространения акустических волн в звукопроводах, находящихся в контакте с исследуемыми веществами. Такой анализ позволяет не только оценить степень влияния анализируемых сред на свойства акустических волн в подобных структурах, но и определить геометрические размеры устройства и его ожидаемые параметры до проведения трудоемких и затратных экспериментов. Однако, для проведения расчетов необходимо знать свойства жидкостей (диэлектрическая проницаемость, вязкость, модули упругости, плотность), которые также необходимо измерять различными методами.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в основном исследования особенностей распространения акустических волн в акустических звукопроводах, находящихся в контакте с жидкостью, проводились для ПАВ и акустических волн нулевого порядка в пьезоэлектрических пластинах. В качестве жидкостей в основном анализировалась вода или водные растворы NaCl и глицерина. Предполагалось, что для анализа вязкости жидкости наиболее предпочтительными являются волны с поперечно-горизонтальной поляризацией. Однако, наличие большого количества акустических волн высших порядков в пластинах из различных пьезоэлектриков позволило предположить существование других типов волн с необычными механическими поляризациями. Кроме того, комбинация различных типов волн и различных пьезоэлектриков может привести к новому подходу разработки селективных методов определения только механических или электрофизических свойств жидкостей. Также интерес представляет исследование свойств не только полярных, но и неполярных жидкостей, в том числе с нано- и микровключениями из новых композитных материалов. Это относится и к исследованию фазовых переходов таких жидкостей в твердое состояние при помощи акустических методов..

Целью диссертационной работы является исследование физических свойств жидкостей, суспензий, водных растворов и их фазовых переходов в твердое состояние с помощью объемных акустических волн и акустических волн в пластинах.

В работе в качестве объекта исследования используются суспензии на основе вазелинового масла, силиконового масла и глицерина с добавками сорбитана моноолеата (SPAN80) и микрочастиц активированного угля; одномолярные водные растворы хлоридов натрия, калия, аммония, кальция, железа (III), никеля. В качестве эталонных жидкостей используются дистиллированная вода и глицерин.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследование электрофизических свойств суспензий.
2. Исследование вязкости жидкости при помощи акустических волн в пьезоэлектрических пластинах и структурах на их основе.
3. Исследование электропроводности жидкости при помощи акустических волн в пьезоэлектрических пластинах.
5. Исследование механических и температурных свойств суспензий при помощи объемных акустических волн.
6. Разработка метода бесконтактного определения электропроводности жидкости при помощи акустических волн в пьезоэлектрических пластинах.

7. Исследование влияния фазового перехода невязкая, непроводящая жидкость – лед на характеристики акустических волн в пьезоэлектрических пластинах.

8. Исследование влияния фазового перехода невязкая, проводящая жидкость – лед на характеристики акустических волн в пьезоэлектрических пластинах.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые

1. Показано, что с помощью метода, основанного на использовании объемных акустических волн, можно исследовать свойства полярных и неполярных жидкостей, а именно, скорость звука, температурный коэффициент скорости, температурный коэффициент задержки, температурный коэффициент расширения, модуль упругости и температурный коэффициент модуля упругости в жидкости. При этом достаточно измерить лишь время задержки продольной объемной акустической волны в исследуемой среде.

2. Найдены акустические волны, распространяющиеся в пластинах YZ, YX LiNbO₃, ST,X, ST,X+90 SiO₂ и 36YX, 36YZ LiTaO₃ и структурах Si/ZnO, Si/AlN, обладающие эллиптической поляризацией в плоскости звукопровода, при этом у данного типа волн отсутствует нормальная к поверхности звукопровода компонента механического смещения.

3. Показано, что электрическое поле, сопровождающее пьезоактивную волну нулевого порядка с поперечно-горизонтальной поляризацией (SH₀) в пластине YX LiNbO₃ проникает в проводящую жидкость, которая находится на расстоянии менее 900 мкм от поверхности пьезоэлектрической пластины, при характеристиках SH₀ волны $f = 2.067$ МГц и $\lambda = 2$ мм (a – частота, λ – длина волны). При этом фаза и амплитуда волны меняются, что позволяет однозначно судить об электропроводности исследуемой жидкости.

4. Показано, что вносимые потери (S_{12}) для акустических волн в диапазоне частот от 15 до 50 МГц в пластинах YZ, YX LiNbO₃, ST,X, STX+90 SiO₂ и 36YX, 36YZ LiTaO₃ при $h/\lambda=1.67$ увеличиваются при изменении контактирующей среды с воздуха на воду и лёд, причем $S_{12}^{\text{воздух}} < S_{12}^{\text{вода}} < S_{12}^{\text{лед}}$. Показано, что по стабилизации вносимых потерь можно определить полное превращение воды в лёд.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов заключается в том, что впервые теоретически обнаружена и экспериментально подтверждена возможность существования, как в пьезоэлектрических пластинах, так и в многослойных структурах на их основе, акустических волн с механической поляризацией в плоскости пластины и минимальной компонентой механического смещения, нормальной к поверхности звукопровода. Это позволило предложить эти волны для реализации акустических датчиков с высокой избирательной чувствительностью к вязкости, что позволило минимизировать влияние перекрестных факторов, таких как температура и электропроводность, на результаты измерений. Теоретической значимостью также обладают результаты исследования свойств акустических волн в пьезоэлектрических пластинах, находящихся в контакте с жидкостью, свойства которой изменяются в процессе фазового перехода первого рода жидкость-лед. Полученные теоретические результаты легли в основу разработки акустических методов, позволяющих решать прикладные задачи, связанные с контролем оледенения авиационных и морских конструкций, улучшением прогнозирования ситуативных изменений агрегатного состояния жидкостей, что критически важно для предотвращения техногенных

катастроф в климатически нестабильных регионах. Практическая значимость полученных результатов связана с разработкой и созданием методов, позволяющих проводить исследования с минимальными объемами образцов (менее 1 мл), что важно для работы с редкими, дорогими или ограниченными по доступности жидкостями. Полученные результаты могут быть использованы для контроля качества смазочных материалов, масел, топлив и других технологических жидкостей в машиностроении, автомобилестроении и нефтепереработке.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Акустические свойства суспензии и их температурные коэффициенты (скорость звука, температурный коэффициент скорости, температурный коэффициент задержки, температурный коэффициент расширения, модуль упругости и температурный коэффициент модуля упругости) могут быть определены одновременно из измерений только времени задержки продольной объемной акустической волны при разных температурах (5°C - 25°C) для одной и той же жидкостной пробы объемом 1 мл в одном экспериментальном цикле. Данный подход применен для определения вышеуказанных параметров суспензий на основе вазелинового масла с такими наполнителями как микро- и нано-частицы активированного угля и SPAN80.

2. В пластинах и структурах на основе слабо пьезоактивных материалов (ST кварц, Si/ZnO, Si/AlN) существуют акустические волны высших порядков с эллиптической поляризацией упругих смещений в плоскости звукопровода и отсутствием нормальной к поверхности звукопровода компоненты механического смещения. Эти волны обладают чувствительностью к вязкости жидкости на два порядка большей, чем к электропроводности и температуре той же жидкости.

3. Электрическое поле, сопровождающее пьезоактивную акустическую волну нулевого порядка с поперечно-горизонтальной поляризацией (SH_0) $f = 2.067$ МГц, $\lambda = 2$ мм в пластине YX ниобата лития, проникает в жидкость с произвольной электропроводностью, находящуюся на расстоянии не более 900 мкм от поверхности пластины, что приводит к изменению фазы и амплитуды этой волны. Это позволяет бесконтактно измерять объемную электропроводность жидкости в диапазоне $0.4 \text{ См/м} - 21.1 \text{ См/м}$.

4. Для вносимых потерь (S_{12}) на распространение акустических волн высших порядков в частотном диапазоне 15 - 50 МГц в пьезоэлектрических пластинах YZ, YX LiNbO₃, ST,X, STX+90 SiO₂ и 36YX, 36YZ LiTaO₃, находящихся в контакте с воздухом, водой или льдом, всегда выполняется соотношение $S_{12}^{\text{воздух}} < S_{12}^{\text{вода}} < S_{12}^{\text{лед}}$. Достижение насыщения величины $S_{12}^{\text{лед}}$ при -15°C соответствует формированию однородного льда. В диапазоне температур от -5°C до -15°C на поверхности пластины существует двухфазная система вода - лед.

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 Всероссийских и международных конференциях, таких как XXXIV, XXXV и XXXVI сессия Российского акустического общества (Москва, 2022, 2023, 2024), Девятая международная конференция по физической электронике ИРЕС-9 (Ташкент, Узбекистан, 2024), LXVIII Международная научная конференция «Актуальные проблемы прочности» (Витебск, Беларусь -2024), 32-я, 33-я и 34-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь-2022, 2023, 2024г), 18-й, 19-й, 20-й Молодежный конкурс имени Ивана Анисимкина (Москва, 2022, 2023, 2024), VI и VIII Международный фестиваль науки «Micro- and nanotechnology: research and applications. Science festival for young scholars». (Саратов. 2021, 2024), XVII Всероссийская конференция молодых ученых «Нанозлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2022г.)

Работа выполнена при поддержке следующих проектов: Российского научного фонда - № 20-19-00708 и № 21-49-00062 и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации - № 075-15-2023-580.

Личный вклад автора.

Автором были проведены все теоретические исследования, представленные в диссертации. Ею проведено планирование и постановка всех экспериментов. Экспериментальные данные получены либо самим автором, либо совместно с соавторами работ, опубликованных по теме диссертации.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 10 статьях, в том числе: в 7 статьях [1*-7*] в журналах, входящих в Международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus, а также в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, в 3 статьях [8*-10*], опубликованных в трудах Всероссийских конференций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава диссертации посвящена исследованию акустических и электрофизических свойств жидкостей и суспензий при помощи акустических волн. Глава разделена на 5 частей. В первой части описан метод определения диэлектрической проницаемости жидкости на основе упрощенной коаксиальной цилиндрической измерительной ячейки [23] для определения емкости жидкости [5*]. Для проведения эксперимента по определению диэлектрических проницаемостей жидкостей использовали полярный глицерин ($\epsilon=45$) и его суспензию с сорбитаном моноолеатом SPAN 80, силиконовое масло (СМ) марки ПМС-100 ($\epsilon=2.1$) и его суспензию с микрочастицами активированного угля (АУ) и вазелиновое масло (ВМ) ($\epsilon=2.25$) и его суспензии с микрочастицами активированного угля и сорбитаном моноолеатом SPAN80. Суспензии с

добавлением микрочастиц активированного угля изготавливались из таблеток угля, которые мололись под гидравлическим прессом с максимальным усилием 10 тонн. Вазелиновое или силиконовое масло с концентрацией угольного порошка 60 мг/мл получали путем смешивания чистого масла с порошком. Для этого в специальную планетарную мельницу (Fritsch PULVERISETTE 7, Германия) были введены угольный порошок, масло и шарики из некоррозионной стали (18 штук диаметром 100 мм). Смесь обрабатывали в мельнице в течение 3 минут при 300 оборотах в минуту с перерывом в 6 минут. Всего было выполнено 20 циклов. Приготовленная смесь оставалась однородной в течение 5 часов. В случае расслоения, проводилась дальнейшая обработка с помощью ультразвукового диспергатора мэф93.1 (МЭЛФИЗ, Россия). Размер частиц измельченного активированного угля в суспензии масел был измерен методом лазерной дифракции на анализаторе размера частиц (Compact-Z, Photocor, Россия).

С помощью коаксиальной измерительной ячейки (рисунок 1) получали значения емкости конденсатора с жидкостью, по которым были рассчитаны значения диэлектрических проницаемостей для каждой жидкости на частотах 1 кГц и 1 МГц. Следует отметить, что данные для чистых жидкостей согласуются со справочными данными. В результате показано, что добавление микрочастиц или поверхностно-активного вещества приводит к увеличению диэлектрической проницаемости и электропроводности всех неполярных жидкостей. Измерения для глицерина показали, что даже в случае изолированных электродов, наблюдается зависимость емкости и диэлектрической проницаемости от частоты. Данный факт может быть связан со свойствами SPAN80, так как это поверхностно активное вещество влияет на реологические свойства раствора, изменяя его структуру.

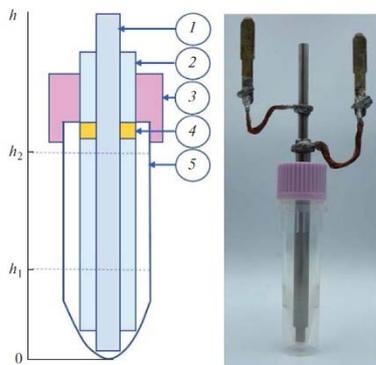


Рисунок 1. Схема измерительной ячейки и ее фото. 1 – внутренний электрод; 2 – внешний электрод; 3 – закручивающаяся крышка с отверстием; 4 – изолятор из тефлоновой прокладки; 5 – эппендорф.

Вторая и третья часть первой главы посвящены исследованию обнаруженной акустической волны Лэмба с механической поляризацией в плоскости пластины и минимальной компонентой механического смещения, нормальной к поверхности звукопровода. В этом случае компоненты механических смещений $u_3 \ll u_1, u_2$ соответствовали плоской эллиптической поляризации, параллельной поверхности пьезоэлектрика (рисунок 2). Волны с такой поляризацией были найдены в пластинах ST,X-кварца (углы Эйлера $0^\circ, 132.75^\circ, 0^\circ$) с $h/\lambda = 0.6; 1.0; 1.67$ ($h = 300$ и 500 мкм; $\lambda = 200$ и 300 мкм). Эти волны использовались для разработки метода определения вязкости жидкости, селективного по отношению к температуре и электропроводности жидкости [4*, 10*]. Работоспособность данного метода была продемонстрирована на примере водных растворов глицерина. Показано, что чувствительность этой акустической волны (рисунок 3) меняется с увеличением вязкости η и составляет 0.3 дБ/сП при $\eta = 1-20$ сП, 0.12 дБ/сП при $\eta = 20-100$ сП и 0.015 дБ/сП при $\eta = 100-1500$ сП. Приведенные данные говорят о разных погрешностях измерений на разных участках калибровочной кривой: 10% на первых двух участках и 40% на последнем

пологом участке. При этом электрические отклики той же волны в пластине меньше вязкостных на два порядка величины и сравниваются с ними лишь при $\eta < 2$ сПуаз. Учитывая погрешность прибора в 0.1 дБ, можно сказать, что акустоэлектронное устройство не чувствительно к изменениям электрических характеристик жидкости. Это связано со слабыми пьезоэлектрическими свойствами кварца.

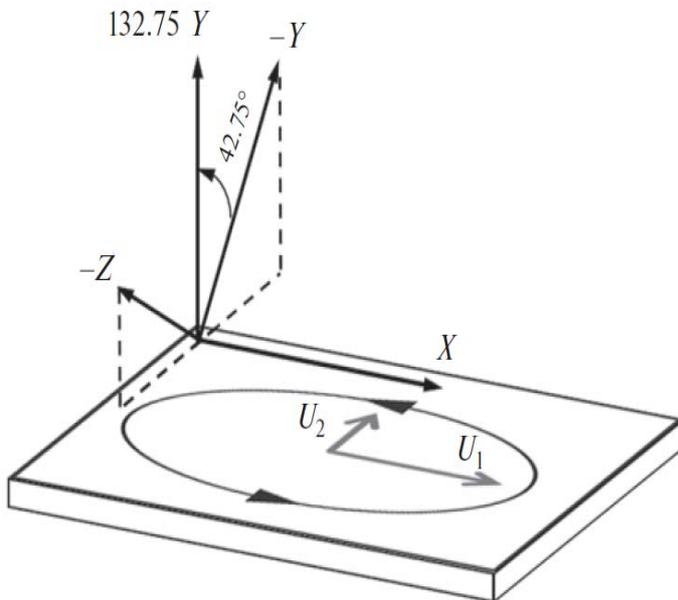


Рисунок 2. Схематическое изображение кристаллографической ориентации пластины ST,X-кварца толщиной $h/\lambda = 1.0$ ($h = \lambda = 300$ мкм) и поляризация акустической волны в пластине на ее поверхности с частотой $f = 49.74$ МГц.

Найденная акустическая волна Лэмба была использована для определения вязкости созданных в первой части первой главы суспензий на основе глицерина и вазелинового и силиконового масел.

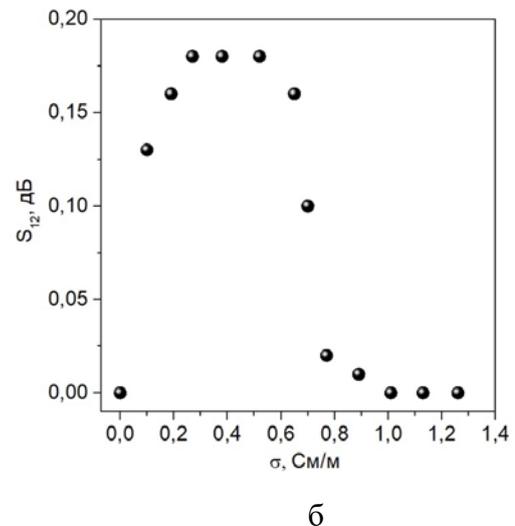
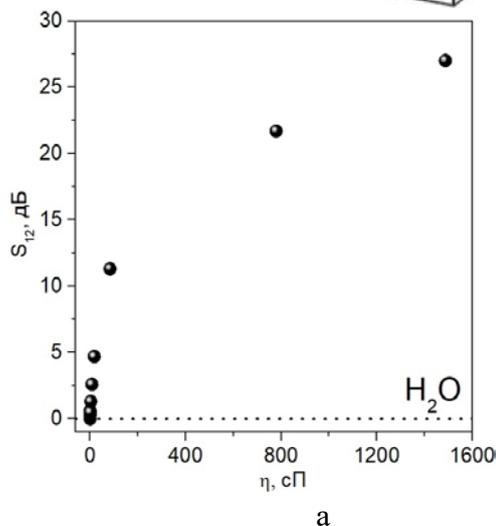


Рисунок 3. Калибровочные кривые акустической волны Лэмба ($f=49.74$ МГц) в пластине ST,X-кварца толщиной $h/\lambda = 1.0$ ($h = \lambda = 300$ мкм) для вязкости (а) и электропроводности (б).

В результате было показано, что при добавлении микрочастиц активированного угля в силиконовое масло вязкость получаемой суспензии снижается. Это связано с изменением реологии и микротекучести силиконового масла при добавлении микрочастиц угля. В свою очередь, вазелиновое масло, в силу большей связи между молекулами, не показало такой зависимости.

Следующим этапом изучения взаимодействия акустических волн в пластинах с вязкой жидкостью было исследование влияния этой жидкости на акустические волны с той же поляризацией в слоистых структурах [6*, 9*]. В этом случае в качестве «слабых» пьезоэлектриков использовали пленки оксида цинка

(ZnO) и нитрида алюминия (AlN), которые наносились на поверхность кремниевых (Si) пластин. Так как кремний – не обладает пьезоэлектрическими свойствами, то коэффициент электромеханической связи (КЭМС) исследуемой акустической волны Лэмба был еще меньше, чем в случае использования «слабого» пьезоэлектрического материала ST,X-кварца.

Для проведения измерений были созданы структуры, содержащие ZnO и/или AlN с с-осью, перпендикулярной поверхности пленки (углы Эйлера $0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$), и пластины Si с углами Эйлера $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ и $(45^\circ, 54.7356^\circ, 0^\circ)$. Нормированная толщина пластины Si h_1/λ лежала в диапазоне от 0.625 до 2.6 ($h_1 = 250$ и 380 мкм, $\lambda = 146, 200$ и 400 мкм). Нормированные толщины h_2/λ пленок ZnO и AlN находились в диапазоне от 0.0005 до 0.084 ($h_2 = 0.2$ и 12.3 мкм, $\lambda = 146, 200$ и 400 мкм). Измерения проводились при комнатной температуре 22.5°C и атмосферном давлении (743 мм рт.ст.).

Пленки ZnO или AlN наносились на пластину Si с одной или с обеих сторон. Для каждой используемой структуры входные и выходные встречно штыревые преобразователи (ВШП) были нанесены на пленку ZnO. Для исследования механических свойств жидкости ячейку из плавленного кварца размещали на поверхности пленки ZnO между ВШП и приклеивали к поверхности с помощью салолла. Размер ячейки был достаточно большим, чтобы избежать возмущения акустического луча стенками ячейки.

На рисунке 4 представлены зависимости изменения вносимых потерь ΔS_{12} от вязкости, электропроводности и температуры жидкости. Калибровочная кривая для вязкости жидкости (рисунок 4(а)) почти линейна для η в диапазоне 0-20 сП, когда жидкость является ньютоновской. При $\eta \approx 1500$ сП жидкость начинает вести себя как упругое вещество, и ΔS_{12} приближается к насыщению. В результате проведенных экспериментов показано, что чувствительность обнаруженной акустической волны Лэмба к вязкости жидкости варьируется от 0.26 дБ/сП при $\eta = 1-20$ сП до 0.087 дБ/сП при $\eta = 20-100$ сП и 0.013 дБ/сП при $\eta = 100-1500$ сП.

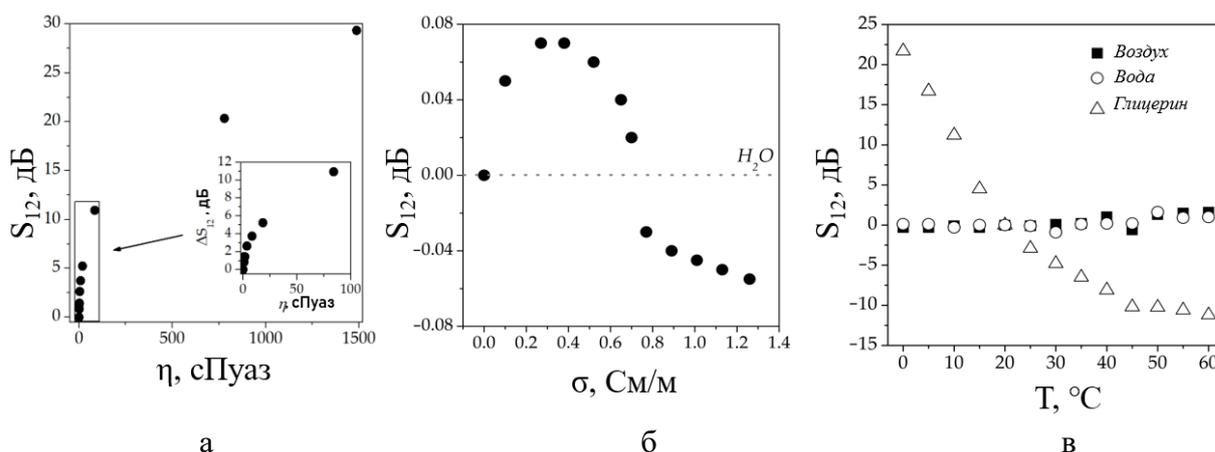


Рисунок 4. Калибровочные кривые метода для чувствительной акустической волны в структуре ZnO/Si для вязкости (а), электропроводности (б) и температуры (б). Частота $f = 49.5$ МГц, $h/\lambda = 1.9$ ($\lambda = 200$ мкм), скорость волны $v = 9900$ м/с.

Четвертая и пятая части первой главы посвящены исследованию влияния электропроводности и вязкости жидкости на свойства акустических волн высших порядков в пьезоэлектрических пластинах. В данном случае рассматривались

анизотропные пьезоэлектрические материалы с высокими значениями пьезоэлектрических констант, в которых акустические волны обладали большим КЭМС. Как известно [24], чем больше КЭМС акустической волны, тем большее влияние на свойства волны оказывает электропроводность жидкости.

Задача о взаимодействии акустических волн с электропроводной жидкостью может решаться несколькими способами. Возможно решение граничной задачи на основе системы уравнений, включающих в себя уравнения движения упругой среды, уравнения Лапласа для пьезоэлектрика, уравнения Пуассона для электропроводящей жидкости, уравнений состояния пьезокристалла и электропроводящей жидкости [24, 25]. В случае акустических волн с малым значением КЭМС для решения задачи о распространении можно использовать теорию возмущения [26]. Кроме того, часто используется метод эквивалентных схем [27]. В данном случае для теоретических расчетов была использована теория возмущения [26]:

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{k^2 \varepsilon_{пл} + \varepsilon_0}{2 \varepsilon_{пл} + \varepsilon_{ж}} \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + \omega^2 (\varepsilon_{пл} + \varepsilon_{ж})^2} \quad (1),$$

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{k^2 \varepsilon_{пл} + \varepsilon_0}{2 \varepsilon_{пл} + \varepsilon_{ж}} \frac{\sigma \omega (\varepsilon_{пл} + \varepsilon_{ж})}{\sigma^2 + \omega^2 (\varepsilon_{пл} + \varepsilon_{ж})^2} \quad (2).$$

Здесь k^2 – КЭМС волны, $\varepsilon_{пл}$, ε_0 , $\varepsilon_{ж}$ – диэлектрическая проницаемость пластины, вакуума и жидкости, соответственно, σ – электропроводность жидкости, ω , α – круговая частота и затухание волны, β – волновое число, v и v_0 – фазовая скорость волны при свободных и металлизированных границах пластины, соответственно.

В результате теоретического анализа было показано, что некоторые волны высших порядков обладают высокой чувствительностью к электропроводности жидкости [2*]. Теоретический анализ позволил дать рекомендации по кристаллографической ориентации пластин, геометрии ВШП, частоте и длине соответствующей акустической волны.

Для проведения экспериментов по исследованию влияния электропроводности жидкости на характеристики акустических волн высших порядков в пьезоэлектрических пластинах были созданы линии задержки на основе пластин $128^\circ YX + \Theta LiNbO_3$ (углы Эйлера 0° , 37.86° , $\Theta = 0^\circ$ и 90°), $64^\circ YX + \Theta LiNbO_3$ (углы Эйлера 0° , -26° , $\Theta = 0^\circ$ и 90°) и $36^\circ YX + \Theta LiTaO_3$ (углы Эйлера 0° , -54° , $\Theta = 0^\circ$ и 90°). Пластины имели одну шлифованную (верхняя) и одну полированную (нижняя) поверхности и их толщина h была равна 500 мкм. Входной и выходной ВШП с периодом $\lambda = 200$ или 300 мкм, содержащие по 40 пар штырей, располагались на полированной поверхности пластин.

В качестве тестируемых жидкостей с переменной электропроводностью σ и слабо меняющимися вязкостью η и диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{ж}$ были использованы дистиллированная вода и водные растворы NaCl с различной концентрацией соли. Значение электропроводности раствора определяли из табличных данных [28] по известным массам воды и NaCl.

В итоге были построены калибровочные кривые для акустических волн высших порядков, распространяющихся в созданных линиях задержки. На рисунке 5 приведены калибровочные кривые для наиболее чувствительной к электропроводности жидкости акустической волны Лэмба. Видно качественное

совпадение теории возмущения и экспериментальных данных. Следует отметить, что перекрестная чувствительность волн к электропроводности и вязкости не позволяет измерять каждый параметр в отдельности.

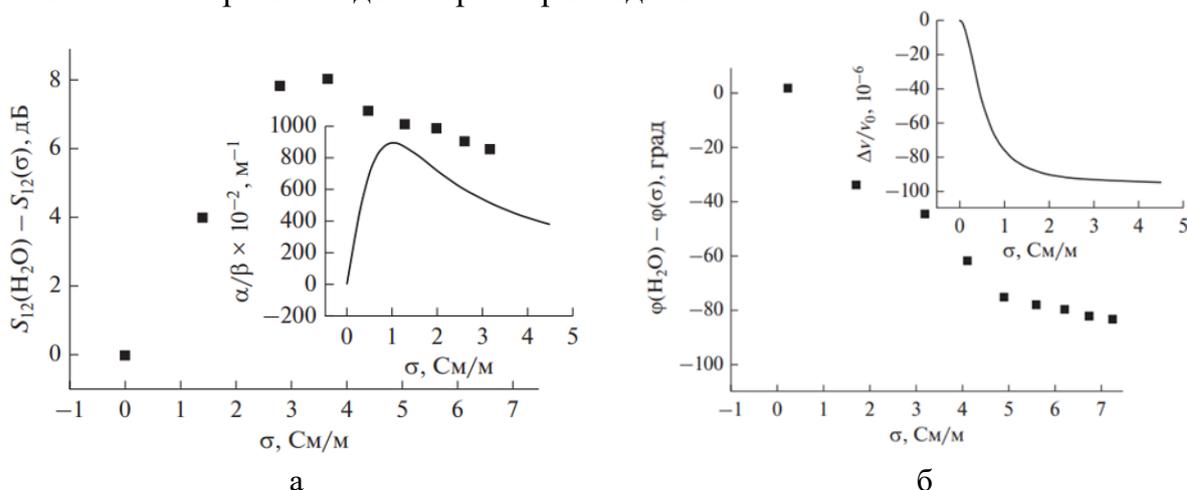


Рисунок 5. Калибровочные кривые для акустической волны Лэмба ($f = 36.926$ МГц) в пластине 128YX LiNbO₃ с $h/\lambda = 1.67$. На вставках – рассчитанные по теории возмущения зависимости.

На следующем этапе проводилось исследование физических свойств жидкости при помощи целого набора акустических волн, распространяющихся в пластине одновременно. Так как каждая акустическая волна в анизотропной пластине в зависимости от направления распространения имеет свой набор характеристик, было решено создать многомодовое устройство на основе круглых трехдюймовых пластин ниобата лития и танталата лития [3*]. Таким образом, появлялась возможность расположить несколько линий задержки под разными углами на пластине. При этом количество акустических волн, зондирующих образец, находящийся в центре шайбы, многократно увеличивалось.

В результате проведенных исследований было показано, что максимальный диапазон измерения электропроводности жидкости для набора использованных волн Лэмба составляет 0-10 См/м для фазовых откликов и 0-20 См/м для амплитудных откликов. Объем тестового образца в обоих случаях составляет около 100 мкл.

В результате проведенных исследований, было показано, что при использовании в качестве звукопровода сильных пьезоэлектриков типа ниобата или танталата лития чувствительность различных типов акустических волн в них к электропроводности жидкости в целом сопоставима с чувствительностью к ее вязкости. Волны, обеспечивающие селективное определение электропроводности, на фоне присутствия вязкостной нагрузки обнаружены не были. Это говорит о том, что измерение только электропроводности вязкой жидкости невозможно при наличии механического контакта между жидкостью и пьезоэлектриком.

Заключительная часть первой главы содержит использование известного акустического метода на основе объемных акустических волн для определения температурных зависимостей и их коэффициентов для новых суспензий (BM + AU, BM + SPAN80) [7*]. Метод был использован чтобы получить такие параметры, как акустическое затухание α , время задержки τ , скорость звука v , температурный коэффициент скорости ТК_V, температурный коэффициент задержки ТК_З,

температурный коэффициент линейного расширения $\frac{1}{l_{ж}} \frac{\Delta l_{ж}}{\Delta T}$, модуль упругости C_{11} и температурный коэффициент модуля упругости TKC_{11} в одном цикле (рисунок 6). Результаты для воды и вазелинового масла показали соответствие табличным данным.

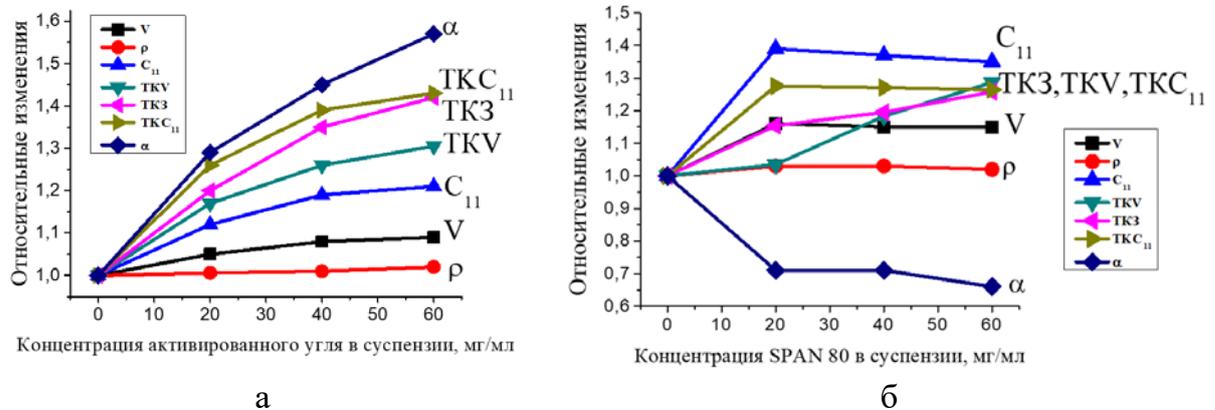


Рисунок 6. Относительные изменения параметров смеси вазелинового масла в зависимости от концентрации микрочастиц активированного угля (а) и SPAN80 (б), нормированные на значения каждого параметра, измеренного при 20°C.

Результаты показали разный характер взаимодействия акустических волн с жидкостями. Это может быть связано с взаимодействием наполнителей с вазелиновым маслом. Микрочастицы активированного угля диспергируются в вазелиновом масле, тогда как SPAN80 сольватируется. Кроме того, хоть оба наполнителя и влияют на реологию жидкости, SPAN80 является поверхностно-активным веществом, которое взаимодействует с маслом сильнее за счет своих свойств.

Вторая глава посвящена исследованию влияния электропроводности жидкости на характеристики акустических волн в структуре «пьезоэлектрическая пластина – воздушный зазор – жидкость».



Рисунок 7. Геометрия задачи. Волна распространяется вдоль x_1 .

Описанный метод определения электропроводности жидкости в первой главе имеет серьёзный недостаток – перекрестную чувствительность акустической волны в пластине к физическим и электрическим характеристикам жидкости. Так как в настоящее время активно разрабатываются бесконтактные методы определения электропроводности, было предложено механически разделить пьезоэлектрическую пластину и жидкую среду.

В этом случае необходимо использовать пьезоактивную акустическую волну. Такие волны сопровождаются электрическим полем, которое может проникать через воздушный зазор в жидкость и взаимодействовать с ее электронами проводимости.

Как известно [24], наибольшим КЭМС обладает волна с поперечно-горизонтальной поляризацией нулевого порядка (SH_0 -волна) в пластине $YX LiNbO_3$.

Для теоретического исследования влияния электропроводности жидкости на SH_0 -волну в пластине $YX LiNbO_3$ была решена граничная задача для структуры «пластина $YX LiNbO_3$ – воздушный зазор – жидкость с произвольной электропроводностью» (рисунок 7). Были записаны соответствующие уравнения

движения, уравнения Лапласа или Пуассона, соответствующие материальные уравнения для всех сред (пьезоэлектрическая пластина, вакуум, электропроводная жидкость). Решение записывалось в виде плоской волны. Была решена задача на поиск собственных значений и собственных векторов для каждой из сред и записаны граничные условия:

$$\begin{aligned} \Phi^{жс} &= \Phi^I, D_3^{жс} = D_3^I j_3^{жс} = 0 \text{ при } x_3 = 0, \\ T_{i3}^{пл} &= 0, \Phi^{пл} = \Phi^I, D_3^{пл} = D_3^I, \text{ при } x_3 = d \\ T_{i3}^{пл} &= 0, \Phi^{пл} = \Phi^{II}, D_3^{пл} = D_3^{II} \text{ при } x_3 = h. \end{aligned} \quad (3),$$

Здесь $i=1$ до 3 , T_{i3} – компоненты механического напряжения, D_3 – нормальная компонента электрической индукции, Φ – электрический потенциал, j_3 – нормальная компонента электрического тока. Индексы *жс*, *пл*, *I* и *II* относятся к жидкости, пластине, вакууму I и вакууму II, соответственно.

В результате расчетов были получены зависимости скорости и затухания акустической SH_0 -волна в пластине YX $LiNbO_3$ от электропроводности жидкости (рисунок 8).

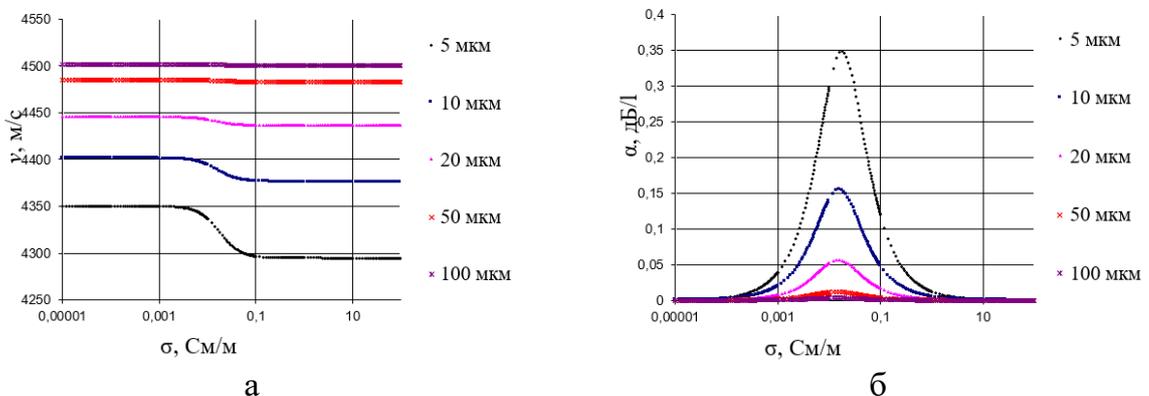


Рисунок 8. Зависимости скорости (а) и поглощения (б) SH_0 волны в структуре «YX $LiNbO_3$ – воздушный зазор – жидкость с произвольной электропроводностью» от электропроводности слоя при $d = 5$ мкм, 10 мкм, 20 мкм, 50 мкм, 100 мкм.

Данные зависимости показали, что при наличии воздушного зазора между пластиной и жидкостью электрическое поле создаваемое пьезоактивной акустической волной взаимодействует со свободными электрическими зарядами внутри жидкости. При чем, чем меньше величина зазора, тем сильнее эффект.

На следующем этапе работы был проведен соответствующий эксперимент [8*]. Была создана акустическая линия задержки на пластине YX $LiNbO_3$ со следующими характеристиками: длина волны $\lambda = 2$ мм; расстояние между принимающим и излучающим ВШП $L = 7.9$ мм; апертура ВШП $W = 8.5$ мм, количество пар штырей $N = 4$, $h/\lambda = 0.25$. В этом случае электрическое поле, сопровождающее пьезоактивную волну, в данном случае выходит из образца на величину 0.2λ , т.е. 400 мкм. Измерительный стенд изображен на рисунке 9. Жидкостную ячейку с электропроводной жидкостью располагали под линией задержки. Зазор регулировался с помощью микровинта. Вся конструкция помещалась в термобокс.

В результате измерений были построены зависимости изменения вносимых потерь и фазы акустического сигнала от проводимости водных растворов NaCl (рисунок 10). Видно, что данный метод эффективен для определения электропроводности жидкости в диапазоне от 0.41 См/м до 21.1 См/м. Однако стоит учесть неоднозначность определения электропроводности по изменению

вносимых потерь (рисунок 10а), а также необходимость жесткого контроля температуры при использовании фазы.

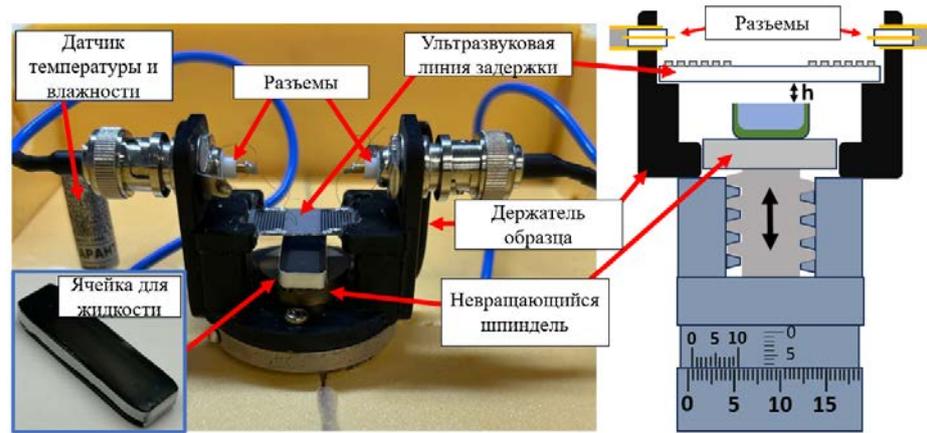


Рисунок 9. Фото и схема эксперимента бесконтактного определения электропроводности жидкости с помощью пластины YX среза ниобата лития, параметры ультразвуковой линии задержки: длина волны $\lambda = 2$ мм; расстояние между ВШП $L = 7.9$ мм; апертура $W = 8.5$ мкм, количество пар штырей $N = 4$, $h/\lambda = 0.25$.

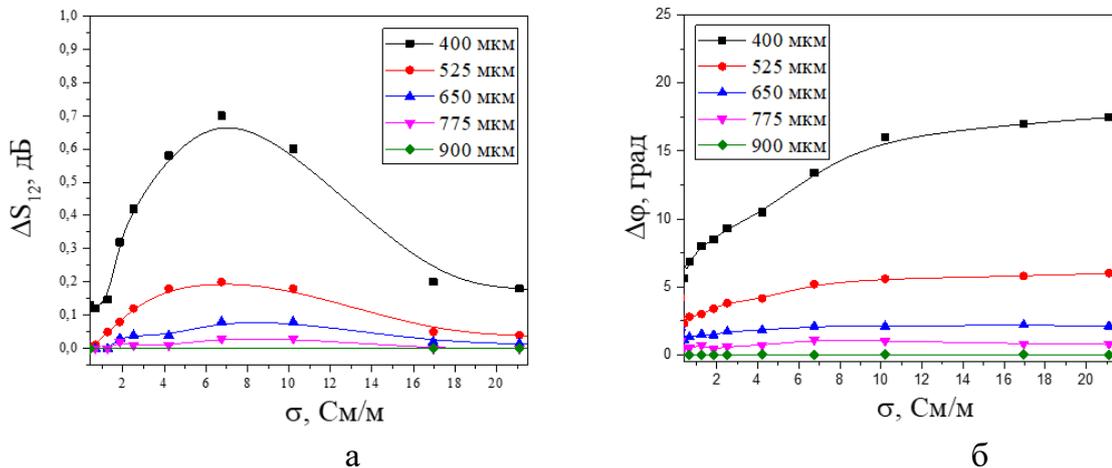


Рисунок 10. Зависимости изменения вносимых потерь ΔS_{12} (а) и фазы $\Delta \varphi$ (б) SH_0 волны от электропроводности жидкости (YX-LiNbO₃, $f = 2.067$ МГц, $h = 500$ мкм, $\lambda = 2$ мм, $h/\lambda = 0.25$)

Третья глава диссертационной работы посвящена исследованию влияния фазового перехода жидкость – лед на характеристики акустических волн в пьезоэлектрических пластинах.

На первом этапе проводилось экспериментальное исследование фазового перехода первого рода невязкой, непроводящей воды в лед при помощи акустических волн высших порядков в пьезоэлектрических пластинах. Измерения проводились при атмосферном давлении с использованием линий задержки [1*]. Линии задержки, использованные в данном разделе были созданы на основе пьезоэлектрических пластин из YZ-LiNbO₃, YZ+90°-LiNbO₃, ST,X-кварц, ST, X+90°-кварц, 36°YX-LiTaO₃ и 36°YX+90°-LiTaO₃.

Для быстрого сравнения заключительных стадий фазовых переходов вода-лед при использовании различных материалов пластин вначале исследовали быстрый процесс охлаждения. В этом случае акустическую линию задержки с тестируемой жидкостью резко охлаждали от +20°C до -15°C со скоростью 0.01°C/c, а затем нагревали обратно от -15°C до +20°C со скоростью 0.02°C/c. На рисунке 11

представлена амплитудно-частотная зависимость вносимых потерь для воды, льда и воздуха. Для всех пластин были построены аналогичные зависимости и выбиралась наиболее чувствительная к фазовому переходу акустическая волна ($f = 38.4$ МГц).

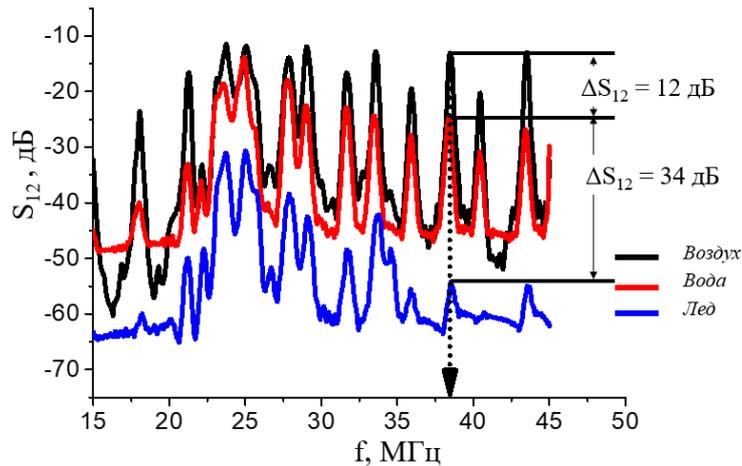


Рисунок 11. Амплитудно-частотные зависимости вносимых потерь S_{12} линии задержки, реализованной на пластине $YZ\text{-LiNbO}_3$ с нормированной толщиной $h/\lambda = 1.67$, без нагрузки при 20°C (черная линия), при нагрузке водой при 20°C (красная линия) и при нагрузке льдом при -15°C (синяя линия) при быстром охлаждении.

Следующим этапом проводились исследования, при которых температура изменялась медленно. На рисунке 12 показано изменение во времени вносимых потерь определенной выше наиболее чувствительной акустической волны ($f = 38.4$ МГц) при медленном изменении температуры от $+20^\circ\text{C}$ (стрелка 1) с промежуточными значениями -5°C (стрелка 2), -10°C (стрелка 3) и -15°C (стрелка 4).

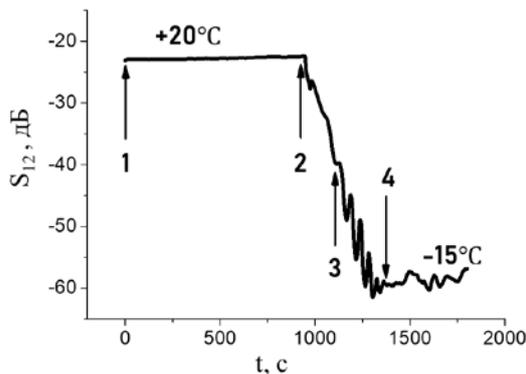


Рисунок 12. Зависимость вносимых потерь S_{12} от времени для линии задержки с дистиллированной водой при медленном охлаждении от $+20^\circ\text{C}$ до -15°C с шагом 5°C и паузой 60 с при каждой температуре. 1 – начало охлаждения, 2 - начало образования льда (-5°C , ~ 900 с), 2, 3 - двухфазная система вода-лед (-10°C , ~ 1100 с), 4 - гомогенная ледяная фаза (-15°C , ~ 1300 с). $YZ\text{-LiNbO}_3$, $h/\lambda = 1.67$, $f = 38.4$ МГц.

Изменение температуры от $+20^\circ\text{C}$ до -5°C в присутствии жидкости на поверхности пластины практически не приводит к изменению величины вносимых потерь. При дальнейшем понижении температуры от -5°C физические характеристики жидкости начинают изменяться. Она превращается в двухфазную жидкую среду и ее вязкость – увеличивается. Это приводит к соответствующему увеличению затухания акустической волны и значение S_{12} резко падает (рисунок 12). Стрелки 2, 3 соответствуют двухфазной системе, в которой присутствуют кристаллиты льда в смеси с водой.

Для исследования фазового перехода одномолярных водных растворов хлорида натрия, калия, аммония, кальция, железа и никеля с целью изучения возможности создания ряда Хофмайстера при помощи акустической методики,

была использована линия задержки на основе пластины YX-LiNbO_3 толщиной $h=330$ мкм, с геометрическими размерами 23.1×13.6 мм.

Для начала определяли наиболее чувствительную к фазовому переходу воды акустическую волну в данной пластине. Для этого измеряли частотную зависимость вносимых потерь S_{12} акустических волн разных порядков n для $T = +20^\circ\text{C}$ и $T = -20^\circ\text{C}$. Частота такой волны составила $f = 52.62$ МГц.

Затем измерение вносимых потерь проводилось либо в медленном режиме (рисунок 13а), с выдержкой на каждой температуре и фиксировании пика поглощения акустической волны. Либо в быстром режиме (рисунок 13б), при котором температуры в климатической камере сразу выставлялась на -30°C , фиксировалась частота волны и наблюдалась динамика изменений.

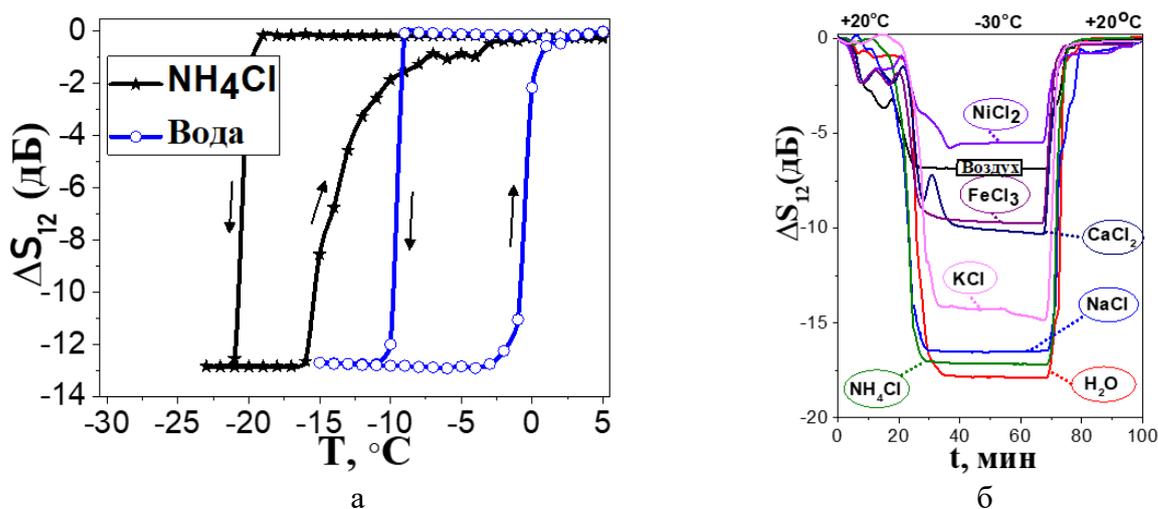


Рисунок 13. Зависимости изменения вносимых потерь ΔS_{12} от температуры при медленном охлаждении (а) и от времени при быстром охлаждении (б) дистиллированной воды и водных растворов хлоридов. Пластина YX-LiNbO_3 , параметры: $h = 330$ мкм, $\lambda = 320$ мкм, $h/\lambda \approx 1$, $f = 52.62$ МГц.

При медленном охлаждении воды и водных растворов хлоридов (рисунок 13а), было замечено, что все растворы имеют различные температуры кристаллизации и плавления, т. е. присутствует гистерезис на зависимости изменения вносимых потерь от температуры. Предполагается, что процесс кристаллизации начинается с верхних слоев жидкости до достижения точки эвтектики, а плавление льда, наоборот, с его нижних слоев. Учитывая специфику взаимодействия акустической волны с тестируемой жидкостью, обнаружено, что время кристаллизации пробы больше чем время ее таяния. Это объясняется тем, что для определения времени кристаллизации необходимо полное оледенение пробы с ее верхних слоев до нижних, а для определения времени таяния достаточно образования жидкого слоя лишь на границе с пластиной, который зондирует акустическая волна. Следует отметить, что площадь петель гистерезиса минимальная у тех растворов, порошки которых хуже всего растворяются в воде.

При быстром охлаждении (рисунок 13б) видно, что акустическая волна реагирует на замерзание каждого раствора уникально, при этом наименьшее поглощение также наблюдается у малорастворимых веществ. Что интересно, наименьшее поглощение наблюдается у раствора хлорида никеля, величина вносимых потерь акустической волны в котором даже меньше, чем у воздуха. Возможно, это связано с кристаллической структурой льда такого раствора.

В заключении говорится, что диэлектрическая проницаемость неполярных жидкостей возрастает с добавлением микрочастиц активированного угля (АУ) и сорбитана моноолеата SPAN80 на десятые доли. Сопротивление суспензии на основе вазелинового масла уменьшается на 2 и 3 порядка при добавлении АУ и SPAN80, соответственно. Сопротивление силиконового масла при добавлении микрочастиц активированного угля уменьшается на 2 порядка. Частотная зависимость характеристик глицерина возрастает при добавлении SPAN80, что связано с его свойствами [5*].

Впервые обнаруженные акустические волны высших порядков в пластинах кварца [4*, 10*] и слоистых структурах [6*, 9*] на основе кремния, оксида цинка и нитрида алюминия с эллиптической поляризацией в плоскости пластины и отсутствием нормальной компоненты механического смещения к поверхности звукопровода подходят для создания селективного по отношению к электропроводности и температуре метода определения вязкости жидкости. Данный метод подходит для исследования механических свойств полярных и неполярных жидкостей. Оптимальные вязкости жидкостей для измерений находятся в диапазоне от 1 до 100 сП. Чувствительность метода меняется с изменением вязкости и составляет 0.3 дБ/сП при $\eta = 1-20$ сП, 0.12 дБ/сП при $\eta = 20-100$ сП и 0.015 дБ/сП при $\eta = 100-1500$ сП для кварца. Чувствительность для слоистых структур составляет величины 0.26 дБ/сП при $\eta = 1-20$ сП, 0.087 дБ/сП при $\eta = 20-100$ сП и 0.013 дБ/сП при $\eta = 100-1500$ сП. При этом акустические отклики на электропроводность жидкости (от 0 до 2 См/м) на два порядка меньше. Для всех «слабых» пьезоэлектриков наблюдается слабая зависимость от температуры.

Показано, что добавление микрочастиц активированного угля и поверхностно-активного вещества SPAN80 в вазелиновое масло и добавление SPAN80 в глицерин не приводит к изменению их вязкости в отличие от силиконового масла при добавлении в него микрочастиц активированного угля. Это может быть связано с изменением микроструктуры силиконового масла и его текучести. Тогда как молекулы вазелинового масла более жестко связаны между собой, следовательно действие той же концентрации микрочастиц угля менее выражено.

Показано [2*, 3*], что при измерении электрических характеристик жидкостей с помощью акустических волн в пластинах из «сильных» пьезоэлектриков предпочтительным является измерение фазы волны, так как такой способ обеспечивает однозначное определение электропроводности исследуемой жидкости. Однако фаза сильно зависит от температуры, что приводит к необходимости термостабилизации разрабатываемого устройства. Данный параметр также неприменим для измерения неравновесных процессов, сопровождающихся выделением или поглощением тепла. Напротив, изменение вносимых потерь акустических волн в пьезоэлектрических пластинах практически не зависит от температуры и может применяться, в том числе, к анализу неравновесных процессов. Однако, оно имеет одинаковую величину для двух значений электропроводности. В связи с этим одно из этих значений должно быть исключено дополнительным измерением, например, с использованием второй акустической волны.

Показано, что, измеряя время задержки и амплитуду колебаний продольных объемных акустических волн [7*], при различных температурах в течение одного

экспериментального цикла для каждой жидкости, можно отличить одну жидкость от другой, включая жидкости с различными примесями. В отличие от других методов, этот метод впервые позволяет одновременно определить семь параметров жидкости в одном образце и за один экспериментальный цикл. Это повышает надежность идентификации жидкости, поскольку сочетание этих параметров можно рассматривать как акустическое изображение исследуемой среды. Метод подходит как для полярных, так и для неполярных жидкостей.

Теоретический анализ распространения акустической волны нулевого порядка с поперечно-горизонтальной поляризацией (SH_0) в структуре «пластина $YX LiNbO_3$ – воздушный зазор – жидкость с произвольной электропроводностью» показал, что электрическое поле, сопровождающее пьезоактивную волну, выходит за пределы звукопровода, и способно взаимодействовать с электрическими зарядами электропроводной жидкости.

На основании проведенного расчета был предложен метод бесконтактного определения электропроводности жидкости с помощью акустических волн с поперечно-горизонтальной поляризацией в пьезоэлектрических пластинах с высоким коэффициентом электромеханической связи [8*].

Экспериментальные исследования показали возможность проникновения электрического поля, сопровождающего SH_0 волну в пластине $YX LiNbO_3$, за пределы звукопровода на расстояние более 400 мкм. Были построены калибровочные зависимости вносимых потерь S_{12} и фазы φ от электропроводности для растворов $NaCl$ [8*].

Показано, что для вносимых потерь (S_{12}) на распространение акустических волн высших порядков в частотном диапазоне 15 - 50 МГц в пьезоэлектрических пластинах YZ , $YX LiNbO_3$, ST, X , $STX+90 SiO_2$ и $36YX$, $36YZ LiTaO_3$, находящихся в контакте с воздухом, водой или льдом, всегда выполняется соотношение $S_{12}^{воздух} < S_{12}^{вода} < S_{12}^{лед}$. Достижение насыщения величины $S_{12}^{лед}$ при $-15^\circ C$ соответствует формированию однородного льда. В диапазоне температур от $-5^\circ C$ до $-15^\circ C$ на поверхности пластины существует двухфазная система вода - лед.

Показано, что при медленном охлаждении водных растворов таких хлоридов как KCl , $NaCl$, NH_4Cl , $CaCl_2$, $FeCl_3$, $NiCl_2$, соответствующие фазовые переходы жидкость – лед и лед – жидкость происходят при разных температурах, в результате чего наблюдается гистерезис процессов кристаллизации и плавления, причем наименьшие площади гистерезиса наблюдаются у веществ с низкой растворимостью в воде ($CaCl_2$, $FeCl_3$, $NiCl_2$).

Результаты по теме диссертации опубликованы в следующих отечественных и международных рецензируемых изданиях:

1*. Anisimkin V., Kolesov V., Kuznetsova A., Shamsutdinova E., Kuznetsova I. An Analysis of the Water-to-Ice Phase Transition Using Acoustic Plate Waves // Sensors. – 2021. – V. 21. – N. 3. – P. 919, DOI: 10.3390/s21030919.

2*. 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 (английская версия: Anisimkin V.I., Kuznetsova I.E., Shamsutdinova E.S. Specific Features of Detection of Electric Characteristics of Conductive Liquids Using Normal Acoustic Waves // Journal of

Communications Technology and Electronics. – 2022. – V. 67. – N. 8. – P. 1022 – 1029, DOI: 10.1134/S1064226922080022).

3*. Smirnov A., Anisimkin V., Voronova N., Shamsutdinova E., Li P., Ezzin H., Qian Zh., Ma T., Kuznetsova I. Multimode design and piezoelectric substrate anisotropy use to improve performance of acoustic liquid sensors // Sensors. – 2022. – V. 22. – N. 19. – P. 7231, DOI: 10.3390/s22197231.

4*. Anisimkin V., Shamsutdinova E., Li P., Wang B., Zhu F., Qian Zh., Kuznetsova I. Selective Detection of Liquid Viscosity Using Acoustic Plate Waves with In-Plane Polarization // Sensors. – 2022. – V. 22. – N. 7. – P. 2727, DOI: 10.3390/s22072727.

5*. Шамсутдинова Е.С., Анисимкин В.И., Фионов А.С., Смирнов А.В., Колесов В.В., Кузнецова И.Е. Совершенствование методов исследования электрофизических и вязкостных свойств жидкостей // Акустический журнал. – 2023. – Т. 69. - №1. - С. 56-62, DOI: 10.31857/S0320791922600238 (английская версия: 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. - V. 69. - N. 1. - P. 87–92, DOI: 10.1134/S1063771022700531).

6*. 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. – V. 23. – N. 17. – P. 7329, DOI: 10.3390/s23177329.

7*. Anisimkin V.I., Voronova N.V., Shamsutdinova E.S., Smirnov A.V., Datsuk E.R., Kashin V.V., Kolesov V.V., Filippova N.V., Kotsyurbenko O.R., Kuznetsova I.E. 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. – V. 379. – P. 115893, DOI: 10.1016/j.sna.2024.115893.

Результаты диссертации опубликованы в следующих трудах российских конференций:

8*. Шамсутдинова Е.С., Смирнов А.В., Кузнецова И.Е. Бесконтактное влияние электропроводности жидкости на характеристики SHO-волны // Труды XXXVI Сессии РАО, г. Москва, 21-25 октября 2024. -2024. -С. 637, DOI: 10.34756/GEOS.2024.17.38908.

9*. Анисимкин В.И., Кузнецова И.Е., Шамсутдинова Е.С. Особенности измерения электрофизических свойств проводящих жидкостей с помощью акустических волн Лэмба высших порядков // Труды XXXV Сессии РАО, г. Москва, 13-17 февраля 2023 г. – 2023. – С. 592, DOI: 10.34756/GEOS.2023.17.38501.

10*. Шамсутдинова Е.С., Анисимкин В.И., Фионов А.С., Колесов В.В., Кузнецова И.Е. Исследование физических свойств жидкостей электроакустическим методом // Труды XXXIV Сессии РАО, г. Москва, 14-18 февраля 2022 г. – 2022. – С. 763-770, DOI: 10.34756/GEOS.2021.17.38156

Список литературы:

1. Khan M. I., Mukherjee K., Shoukat R., Dong H. Microsystem Technologies. – 2017. – V. 23. – P. 4391–4404. DOI: 10.1007/s00542-017-3495-5.

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

3. Zaitsev B. D., Semyonov A. P., Teplykh A. A., Borodina I. A. A new liquid sensor based on a piezoelectric resonator with a radial electric field // *Ultrasonics*. – 2022. – V. 119. – P. 106603. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106603.
4. Zaitsev B. D., Borodina I. A., Teplykh A. A. Compact liquid analyzer based on a resonator with a lateral excitation electric field // *Ultrasonics*. – 2022. – V. 126. – P. 106814. DOI: 10.1016/j.ultras.2022.106814.
5. Wang Y., Rajib S. M. S. M., Collins C., Grieve B. Low-cost turbidity sensor for low-power wireless monitoring of fresh-water courses // *IEEE Sensors Journal*. – 2018. – V. 18. – N. 11. – P. 4689–4696. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2826778.
6. Wei Y., Jiao Y., An D., Li D., Li W., Wei Q. Review of dissolved oxygen detection technology: From laboratory analysis to online intelligent detection // *Sensors*. – 2019. V. 19. – N. 18. – P. 3995. DOI: 10.3390/s19183995.
7. Miclos S., Baschir L., Savastru D., Savastru R., Lancranjan I. I. Detection of impurities using a SILPG sensor embedded into graphene reinforced composites // *Composite Structures*. – 2021. – V. 256. – P. 113062. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113062.
8. Anisimkin V. I., Voronova N. V. New modification of the acoustic Lamb waves and its application for liquid and ice sensing // *Ultrasonics*. – 2021. – V. 116. – P. 106496. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106496.
9. 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.
10. Kobayashi S., Kondoh J. Feasibility study on shear horizontal surface acoustic wave sensors for engine oil evaluation // *Sensors*. – 2020. – V. 20. – N. 8. – P. 2184. DOI: 10.3390/s20082184.
11. Казаков Л. И. Резино-жидкостный резонатор // *Акуст. журн.* – 2020. – Т. 66, – № 4. – С. 357–365. DOI: 10.31857/S0320791920020033.
12. Анисимкин А. В., Покусаев Б. Г., Складнев Д. А., Сорокин В. В., Тюпа Д. В. Применение акустоэлектронной методики для исследования упорядоченных микроструктурированных дисперсных систем с биологическими объектами, включенными в гидрогель // *Акуст. журн.* 2016. – Т. 62, – № 6. – С. 738–743. DOI: 10.7868/S0320791916060010.
13. Минаков А. В., Пряжников М. И., Дамдинов Б. Б., Немцев И. В. Исследование объемной вязкости наносuspензий методом акустической спектроскопии // *Акуст. журн.* 2022. – Т. 68, – № 2. – С. 182–189. DOI: 10.31857/S0320791922020058.
14. Kondoh J., Nakayama K., Kuznetsova I. Study of frequency dependence of shear horizontal surface acoustic wave sensor for engine oil measurements // *Sens. Actuators A*. – 2020. – V. 325. – P. 112503. DOI: 10.1016/j.sna.2020.112503.
15. Ахметов Б. Р., Вахин А. В. О некоторых характеристиках затухания ультразвука в суспензиях высокомолекулярных компонентов нефти // *Акуст. журн.* – 2018. – Т. 64, – № 5. – С. 566–571. DOI: 10.1134/S0320791918050015.
16. Tomchenko M. D. Acoustic modes in He I and He II in the presence of an alternating electric field // *J. Low Temp. Phys.* – 2020. – V. 46. – N. 5. – P. 490–501. DOI: 10.1063/10.0001053.
17. Zaitsev B. D., Teplykh A. A., Borodina I. A., Kuznetsova I. E., Verona E. Gasoline sensor based on piezoelectric lateral electric field excited resonator // *Ultrasonics*. – 2017. – V. 80. – P. 96–100. DOI: 10.1016/j.ultras.2017.05.003.

18. Будаева О. А., Дамдинов Б. Б., Отто Г. П., Шагжин С. Н. Исследование вязкости различных растительных масел // Инновационные технологии в науке и образовании - III : Сборник трудов международной научно-практической конференции, Улан-Удэ, 15–18 июля 2013 года. – Улан-Удэ: Бурятский государственный университет. – 2013. – С. 43-48.
19. Hansman Jr R. J., Kirby M. S. Measurement of ice growth during simulated and natural icing conditions using ultrasonic pulse-echo techniques // Journal of Aircraft. – 1986. – V. 23. – N. 6. – P. 492–498.
20. Vetelino K. A., Story P. R., Mileham R. D., Galipeau D. W. Improved dew point measurements based on a SAW sensor // Sensors and Actuators B: Chemical. – 1996. – V. 35, – № 1–3. – P. 91–98.
21. Wang W., Yin Y., Jia Y., Liu M., Liang Y., Zhang Y., Lu M. Development of a love wave based device for sensing icing process with fast response // Journal of Electrical Engineering & Technology. – 2020. – V. 15. – P. 1245–1254.
22. 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. – V. 58. – P. 1004–1010.
23. Ахадов Я. Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. М.: Изд-во МАИ, 1999. 854 с.
24. Зайцев Б. Д., Кузнецова И. Е. Акустические волны в тонких пьезоэлектрических пластинах. 2018.
25. Дьелесан Э. Р. Д. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов. 1982.
26. Tiersten H. F., Sinha B. K. A perturbation analysis of the attenuation and dispersion of surface waves // Journal of Applied Physics. – 1978. – V. 49. – N 1. – P. 87–95.
27. Martin S. J., Frye G. C., Ricco A. J. Characterization of SH acoustic plate mode liquid sensors // Sensors and Actuators. – 1989. – V. 20. – N. 3. – P. 253–268.
28. Chemical Rubber Company Handbook of Chemistry and Physics. 67th ed. / Ed. R. C. Weast, M. J. Astle, W. H. Beyer. Boca Raton: CRC Press, 1986. P. D254.