

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Петронюк Юлии Степановны,  
на диссертационную работу Агейкин Никита Алексеевич на тему  
«ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛАСТИН НА  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ С НАГРУЗКОЙ,  
РАСПОЛОЖЕННОЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЫ»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности

1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

### Общая характеристика работы

В диссертационной работе Агейкина Никиты Алексеевича представлены результаты научного исследования, нацеленного на разработку акустоэлектронных методов идентификации жидкостей, контроля их вязкости, электропроводности, диалектической проницаемости и агрегатного состояния. Диссертантом выполнен аналитический обзор исследований в области современной сенсорики газов и жидкостей, в том числе подробно рассмотрены принципы функционирования и реализации современных акустоэлектронных устройств, выявлены существующие ограничения и предложено перспективное направление развития таких устройств. В работе предложено рассмотреть сенсорную систему с единым пьезоэлектрическим элементом и использовать анизотропию его свойств для повышения чувствительности сенсора за счет многоканальности и увеличения числа возбуждаемых акустических мод. В диссертации рассмотрены базовые для акустоэлектроники анизотропные пьезоэлектрики – ниобат лития, танталат лития и кварц, свойствами которых определяются характеристики возбуждаемых волн, в данном случае волн Лэмба.

**Первая глава** диссертации посвящена разработке многопараметрического метода определения «вкуса» жидкостей с помощью волн различной поляризации, возбуждаемых в анизотропной пьезоэлектрической пластине. Задача была успешно решена теоретически и экспериментально. Теоретически было показано наличие акустических мод, чувствительных к вариациям вязкости и электропроводности жидкостей пяти базовых вкусов. Было выявлено, что акустические потери могут быть обусловлены как электрическими, так и механическими свойствами жидкостей, поляризацией возбуждаемых волн. Для экспериментального исследования был применен многомодовый датчик жидкости на пластине из ниобата лития. На поверхности пластины возбуждались акустические волны в 4-х направлениях-каналах 0, 90, 30 и 60°, внутри каждого канала регистрировались волны Лэмба, наиболее чувствительные к свойствам жидкостей. Величина вносимых жидкостью акустических потерь регистрировалась для анализа и построения ориентационных гистограмм. Гистограммы для слабвязких жидкостей с разными вкусами сравнивались по форме, площади, выявлялась их корреляция с электропроводностью и диэлектрической проницаемостью анализируемой жидкости. Метод позволил уверенно выявлять пять вкусов; измерения проводились с точностью 0.1 дБ. Были собраны акустические портреты некоторых пищевых жидкостей в зависимости от производителя и, таким образом показано, что предложенный подход имеет высокий практический потенциал для экспресс-контроля пищевых и других жидкостей без необходимости проведения детального химического анализа.

**Вторая глава** посвящена исследованию влияния анизотропии сенсорной пластины на детектирование фазового перехода вода-лёд, возникающего на её поверхности. Было выполнено теоретическое и экспериментальное исследование. Соискателем было обнаружено, что в анизотропных пьезопластинах ниобата лития существуют волны, критически зависящие от внешних условий: они полностью затухают при наличии на поверхности слоя воды, но сохраняются при обледенении поверхности. Этот интересный эффект был впервые продемонстрирован и опубликован диссертантом в 2024 году.

**В третьей главе** экспериментально исследована возможность применения многоканального многомодового акустоэлектронного устройства для решения задач идентификации технических и биологических суспензий, мониторинг которых актуален в машиностроении и медицине. Экспериментальное исследование биологических жидкостей показало интересную возможность определения вида возбудителя в бактериальном растворе. В диссертации показано, что затухание волн Лэмба в анизотропной пластинке используемого акустоэлектронного устройства, оказывается более чувствительно к грамположительным, чем грамотрицательным бактериям. Исследование этого эффекта имеет существенное значение и предполагает дальнейшее развитие междисциплинарного сотрудничества в области медицинской диагностики.

**Четвертая глава** является завершающей и посвящена более детальному, фундаментальному рассмотрению механизмов затухания акустических волн, которые лежат в основе предложенного диссертантом сенсорного акустоэлектронного многопараметрического устройства. В том числе исследовалась анизотропия радиационных потерь волн Лэмба в пластинках кварца, танталата и ниобата лития разных срезов при контакте с водой. Было показано, что помимо переизлучения продольной объемной волны в жидкость и волноводного механизма, обусловленного значительно более высокой скоростью акустической волны в пластине по сравнению с жидкостью, в некоторых случаях существенный вклад дает излучательный механизм, при котором нормальная компонента вектора смещений для волны Лэмба бегущей в плоскости пластины превышает остальные её компоненты поляризации.

Основные результаты диссертационной работы представлены в **заключении**.

**Научная новизна** исследования заключается в следующем:

- Предложен многомодовый многопараметрический акустический метод определения «вкуса» водных растворов жидкостей с помощью волн различной поляризации, возбуждаемых в анизотропной пьезоэлектрической пластине. Показан потенциал акустоэлектронного устройства с несколькими линиями задержки на единой пьезопластине, обеспечивающих распространение акустических волн с различными фазовыми скоростями и частотами в зависимости от её анизотропии.
- Показано, что при возбуждении волн Лэмба в анизотропной пластине покрытой слоем воды существуют такие акустические моды, которые могут полностью затухать и снова возникать при фазовом переходе вода/лед. Для ниобата лития определена кристаллографическая ориентация, которая позволяет регистрировать полное отсутствие всех волн в диапазоне частот 3-60 МГц, за исключением одной 36.8 МГц.
- Обнаружено, что величина акустических потерь для волн Лэмба в анизотропной пьезоэлектрической пластине под слоем воды зависит от нормальной компоненты вектора смещений на её поверхности. Показано, что величина акустических потерь может достигать 4 дБ/мм, приближаясь к значению радиационных потерь для поверхностных акустических волн.
- На примере суспензий аэробных бактерий *Rhodococcus sp* и *Metylobacterium sp* в питательной среде Лурье-Бертрана показана возможность определения вида аэробных бактерий с помощью многомодового многопараметрического акустоэлектронного сенсора.

- На примере суспензии силиконового масла с микрочастицами железа и оксида железа показано, что предложенный в диссертации метод позволяет выполнять анализ загрязнения вязкой среды металлическими микрочастицами размером до 10 мкм.

**Достоверность** результатов исследования подтверждена применением известных методик регистрации и обработки данных, их воспроизводимостью в эксперименте. Представленные выводы не противоречат данным, имеющимся в научной литературе, а дополняют и расширяют их.

Основные результаты работы были доложены на 7 российских и международных конференциях по теме диссертации. Автор имеет 6 публикаций по теме исследования в научных журналах, индексируемых в Международных реферативных базах данных и системах цитирования Web of Science и Scopus, в Белом списке и рекомендованных ВАК.

**Практическая значимость** результаты работы являются значимым фундаментальным вкладом в развитие современных акустических методов и сенсорных устройств, в том числе для анализа жидкостей, их фазового состояния, контроля степени загрязнения вязких жидкостей и смазок, экспресс анализа биологических жидкостей на наличие грамположительных бактерий.

Основное содержание работы соответствует требованиям специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

**Замечания:**

1. Нужно отметить аккуратное оформление текста диссертационной работы, удобное и понятное изложение полученных результатов – как теоретических, так и экспериментальных, а также достаточно полный и понятный анализ уже существующей литературы по теме исследования.

2. В качестве основного замечания можно указать следующее. Автором работы не указаны недостатки многомодового многопараметрического акустоэлектронного сенсора и возможные сопутствующие ограничения для его практического применения.

Например, связанных с влиянием внешних условий и старением сенсора.

- Как повышенная температура окружающей среды повлияет на затухание волн Лэмба в пластине и, как следствие, на общую чувствительность сенсора?
- Влияют ли механические воздействия на чувствительность сенсора, и могут ли они создавать паразитные сигналы, сопоставимые с полезным сигналом от сорбции молекул.
- Существуют ли сложности при создании портативного полевого варианта устройства для проведения экспресс-анализа?
- Требуется ли специальная очистка сенсорного элемента после каждого измерения для обеспечения воспроизводимости результатов?
- Есть ли какая-то инерционность при установлении равновесия сорбции на поверхности сенсора и получения стабильного отклика? Какое требуется время для потокового анализа?
- Есть ли ограничения по анализируемым средам? Например, как зависит затухание волн Лэмба в пластине, нагруженной суспензией частиц, от физических параметров этих частиц (количество, размер, плотность, электропроводность, способность к адсорбции)?
- При работе с биологическими жидкостями, является ли обязательным условием сохранение бактерий живыми для их детектирования предложенным методом?

Нужно отметить, что главным недостатком таких систем является компромисс между универсальностью и точностью. Акустоэлектронные устройства подходят для быстрой сортировки, но пока уступают лабораторным методам (хроматографии) в точности количественного и качественного анализа. В своей работе Никита Алексеевич показал,

