

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева

УДК 534.2:537.8

На правах рукописи

**ЖАКИЕВ НУРХАТ КУАНДЫКОВИЧ**

**Изучение электромагнитных и акустических волновых полей в  
анизотропных пьезоэлектриках методом матрицанта**

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора философии (PhD) по специальности  
6D060400 – Физика

Научные консультанты  
доктор физ.-мат. наук,  
профессор С. К. Тлеукенов  
кандидат физ.-мат. наук  
В. Г. Можяев

Республика Казахстан  
Астана, 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ</b> .....	4
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>1 СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ ПЕРВОГО ПОРЯДКА ДЛЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И МАТРИЦАНТ ОДНОРОДНЫХ СРЕД</b> .....	14
1.1 Уравнения Максвелла и уравнения движения для пьезоэлектрической среды .....	14
1.2 Структура матрицы коэффициентов для ромбической симметрии классов $mm2$ и $222$ .....	19
1.2.1 Неоднородность среды вдоль оси X.....	19
1.2.2 Неоднородность среды вдоль оси Y.....	24
1.2.3 Неоднородность среды вдоль оси Z.....	26
1.3 Структура матрицы коэффициентов для тетрагональной симметрии классов $4mm$ и $\bar{4}2m$ .....	27
1.4 Матрицант для однородных пьезосред. Аналитическое решение.....	32
<b>2 ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ АКУСТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ</b> .....	37
2.1 Поверхности упругих и электромагнитных волновых векторов.....	37
2.2 Угол сноса между фазовой и групповой скоростями.....	41
2.3 Анизотропия плотности потока акустической энергии.....	48
<b>3 ЗАДАЧИ ОТРАЖЕНИЯ И ПРЕЛОМЛЕНИЯ</b> .....	52
3.1 Матрица <b>R</b> . Аналитическое решение задачи отражения и преломления.....	53
3.2 Расчет связанных волновых полей при отражении и преломлении.....	57
3.3 Отражение и преломление электромагнитной волны на границе жидкость – пьезоэлектрик.....	60
3.4 Отражение и преломление упругой SH волны на границе диэлектрик– пьезоэлектрик.....	66
3.5 Численный анализ элементов матрицы <b>G</b> .....	72
<b>4 ПОВЕРХНОСТНАЯ ВОЛНА ГУЛЯЕВА-БЛЮСТЕЙНА</b> .....	76
4.1 Условия существования волн Гуляева-Блюстейна.....	77
4.1.1 Металлизированная поверхность .....	77
4.1.2 Свободная поверхность .....	79
4.2 Характеристики ПАВ Г-Б в ромбических кристаллах класса $mm2$ .....	82
4.3 Изменение угла среза. Численные расчеты характеристик. ....	84
4.4 Волна Гуляева-Блюстейна в тетрагональных пьезокристаллах.....	87

<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	90
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	93
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А – Список опубликованных работ</b> .....	101

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- ПАВ – поверхностная акустическая волна;  
Г-Б – Гуляева-Блюстейна;  
КЭМС - коэффициент электромеханической связи;  
ЭМ – электромагнитная;  
СДУ – система дифференциальных уравнений;  
TE, TM – компоненты электромагнитной волны с поляризациями:  
Transverse Electric, Transverse Magnetic;  
SH – поперечно-горизонтальная (shear-horizontal) упругая волна;  
SV – поперечно-вертикальная (shear-vertical) упругая волна;  
 $E_i$  – составляющая вектора напряженности электрического поля;  
 $H_i$  – составляющая вектора напряженности магнитного поля;  
 $B_i$  – составляющая вектора индукции магнитного поля;  
 $D_i$  – составляющая вектора индукции электрического поля;  
 $\epsilon_{ij}$  – компоненты тензора диэлектрической проницаемости кристалла;  
 $\mu_{ij}$  – компоненты тензора магнитной проницаемости кристалла;  
 $c_{ijkl}$  – упругие модули кристалла;  
 $e_{ijk}$  – пьезоэлектрические коэффициенты;  
 $\rho$  – плотность среды;  
 $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжения;  
 $\omega$  – угловая (радиальная, циклическая, круговая) частота;  
 $\vec{u}$  – вектор смещения;  
 $\vec{W}$  – вектор-столбец независимых переменных;  
 $\mathbf{I}$  – единичная матрица;  
 $\mathbf{B}$  – матрица коэффициентов системы дифференциальных уравнений;  
 $\mathbf{G}$  – матрица относительных коэффициентов отражения для амплитуд волновых компонентов: смещения, напряжения, напряженности электрического и магнитного полей;  
 $\mathbf{R}$  – матрица, описывающая связь волн на границе полупространства;  
матрицант  $\mathbf{T}$  – нормированная матрица фундаментальных решений системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка;  
 $b_{ij}$  – элементы матрицы коэффициентов;  
 $k_i$  – волновые векторы;  
 $R_i$  – обратная скорость;  
 $\psi$  – угол между углами распространения фазовой ( $\theta$ ) и групповой ( $\varphi$ ) скоростями (угол сноса потока энергии относительно нормали к волновому фронту);  
 $A$  – коэффициент концентрации, характеризующий анизотропию плотности потока акустической энергии, распространяющейся от точечного или линейного источника в кристалле.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Теоретическое изучение распространения упругих волн в анизотропных средах с различными физическими свойствами, такими как пьезоэффект и др., является одной из фундаментальных задач акустики твердого тела и, в частности, акустоэлектроники. Входит в перечень приоритетных направлений исследования Государственной программы по форсированному индустриально-инновационному развитию Республики Казахстан на 2010 – 2014 годы [1].

Основные методы генерации акустических волн, традиционные для научных и прикладных исследований, основаны на использовании пьезоэлектрического эффекта. С середины 50-х годов XX века область приложения пьезоэлектриков существенно расширилась. Разнообразные физические явления, связанные с распространением и взаимодействием упругих волн и электрических полей в пьезоэлектрических средах, нашли широкое применение в различных устройствах акустоэлектроники и акустооптики, в беспроводных системах связи, в ультразвуковой дефектоскопии, акустической микроскопии и в разработке чувствительных элементов и датчиков [2-15].

Наличие в материальной среде прямого и обратного пьезоэффекта приводит к взаимосвязанности и взаимной генерации упругих и электромагнитных волн, но связанность таких пьезоупругих волн существенно усложняет задачу их анализа. Поэтому для решения данной задачи широко применяются приближенные методы. Развитый к настоящему времени математический аппарат акустики пьезокристаллических твердых тел в большинстве случаев ограничен рамками квазиэлектростатического приближения [2-8, 16-17]. Такое приближение не всегда, однако, применимо к задачам, в которых необходимо учитывать вклад электромагнитных волн, в частности, к задачам, соответствующим результатам недавно опубликованных статей [18-22]. В этих статьях сообщалось о прямом экспериментальном наблюдении электромагнитного излучения от акустических волн, распространяющихся в пьезоэлектрике, в том числе и в терагерцовом частотном диапазоне. Известны также экспериментальные наблюдения генерации акустической волны при воздействии электромагнитной волны на пьезоэлектрик [23-25]. В патенте [26] предложены схемы анализа упругой волны, возбужденной ЭМ волной на поверхности пьезоэлектрика. Отдельные вопросы пьезоэлектрической взаимосвязи упругих волн с электромагнитной волной изучались теоретически в статьях [27-39], но эти исследования охватывают далеко не весь круг разнообразных актуальных задач, для которых необходим учет такого рода взаимодействий. Если более ранние исследования проводились аналитическими методами для высокосимметричных кристаллов и для определенных срезов, то для более сложной анизотропии соответствующие системы дифференциальных уравнений (СДУ) решаются приближенными численными методами (методами конечных разностей, конечных элементов, методом Найстрема). В связи с изложенными фактами и обстоятельствами

актуальным и важным вопросом современной акустоэлектроники представляется решение акустических задач для пьезоэлектриков в полной электромагнитной постановке.

Следует отметить, что создание акустоэлектронных устройств помимо отмеченного взаимодействия упругих и электромагнитных волн требует учета и множества других факторов, влияющих на распространение акустических волн в твердом теле. В их число входят отражение, преломление, локализация, фокусировка и другие волновые эффекты [5, 40-42].

В настоящее время широко известна и доказана эффективность применения матричных методов для изучения волновых процессов различной природы и в различных структурах. Матричные методы применяются, например, при численном анализе уравнений дисперсии волн в периодических средах, для приближенного решения задач распространения волн в высокосимметричных анизотропных средах, развиваются методы исследования распространения волн в стратифицированных и многослойных структурах [43-55]. Основная проблема при этом заключается в получении матрицы фундаментальных решений – матрицанта.

Несмотря на широкое и давнее применение различных подходов матричного формализма, таких как решение Грина-Кристофеля, методы Стро-Барнета, Войгта [2, 56-58] вопрос о структуре матрицанта был впервые рассмотрен сравнительно недавно (по историческим меркам) в работах С.К. Тлеукунова [59-64]. На основе применения полиномов Чебышева-Гегенбауэра им был построен матрицант конечного периодически неоднородного слоя. Получено модифицированное условие для нахождения дисперсионных уравнений в периодических структурах при взаимной трансформации упругих волн [65-68]. Методом матрицанта исследованы задачи о распространении волн в анизотропных упругих, пьезоэлектрических, пьезомагнитных, магнитоэлектрических, термоупругих средах [65, 68-74].

Такие и подобные им усовершенствованные передовые аналитические подходы представляются более ценными по сравнению с численными решениями, поскольку позволяют глубже понять и изучить волновые процессы в упругой среде. Так, например, метод первых интегралов, предложенный В.Г. Можаяевым, дает возможность легко получать секулярные уравнения вплоть до ромбической симметрии, представить пьезоакустическое уравнение движения в виде системы дифференциальных уравнений второго порядка, определять предельные объемные волны и секторы несуществования ПАВ Г-Б [75-80].

Изложенные соображения позволяют сделать вывод, что изучение связанных акустоэлектромагнитных волновых полей в анизотропных пьезоэлектрических средах применением усовершенствованных аналитических методов и в полной акустоэлектромагнитной постановке представляет собой сложную, но **актуальную** задачу современной акустоэлектроники.

Приведенные обоснования актуальности обсуждаемой темы показывают и доказывают перспективность теоретического исследования и практического использования электроупругих волн, распространяющиеся в пьезоэлектрических средах. Необходимо и важно, таким образом, выявить

общие закономерности распространения акустических волн в их связке с ЭМ волнами в пьезоэлектриках.

В настоящей работе в рамках линейной теории упругости и на основе представления решений в виде плоских волн изучается распространение взаимосвязанных акустических и электромагнитных волн в безграничных и ограниченных пьезодиэлектрических анизотропных средах. Данная тематика охватывает такие проблемы, как нахождение фазовых и групповых скоростей, поляризационных характеристик, исследование эффектов, связанных с отражением, преломлением, трансформацией акустических и электромагнитных волн на границе раздела сред, изучение условий существования ПАВ, расчет коэффициентов электромеханической связи.

**Целью работы** является проведение анализа распространения связанных акустических и электромагнитных волновых полей в безграничных и полугораниченных пьезоэлектрических средах тетрагональной и ромбической симметрии с использованием полной системы уравнений Максвелла на основе метода матрицанта.

Для достижения этой цели поставлены следующие **задачи исследования**:

- получить матрицы коэффициентов системы дифференциальных уравнений для пьезоэлектрических сред тетрагональной и ромбической симметрии с использованием полной системы уравнений Максвелла и провести анализ связанных упругих и ЭМ волн в разных координатных плоскостях с учетом неоднородности среды вдоль одной из кристаллографических осей ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ );

- исследовать анизотропию пьезосред: получить для однородной пьезоэлектрической среды тетрагональной и ромбической симметрии аналитические значения фазовых и групповых скоростей связанных волн, построить индекатрисы; рассчитать угол отклонения групповой скорости от фазовой, распределение и плотность потока упругой энергии;

- аналитически решить задачу отражения и преломления электромагнитной волны от границы жидкость-пьезоэлектрик и провести численный анализ коэффициентов отражения, преломления и трансформации падающей ЭМ волны в упругую волну в зависимости от угла падения. Провести исследования эффекта акустического двойного лучепреломления без изменения ветви в случае падения SH волны на границу диэлектрика с пьезоэлектриком;

- определить условия существования поверхностных акустических волн (ПАВ) Гуляева-Блюстейна для пьезоэлектрического полупространства тетрагональной и ромбической симметрии с металлизированной и свободной границей. Исследовать характеристики этих волн: скорость, коэффициенты спадания упругой и электромагнитной парциальных волн, электромеханическую связь для двух геометрий а) X-срез, Y - направление распространения и б) Y-срез, X –направление распространения, также при плавном переходе от одной геометрии к другой путем поворота среза кристалла вокруг оси Z.

**Объектом исследования** являются связанные акустические и электромагнитные волны в пьезоэлектриках тетрагональной и ромбической симметрий.

**Предметом исследования** является изучение характеристик распространения связанных электромагнитных и акустических волновых процессов в пьезоэлектрических средах тетрагональной и ромбической симметрий.

**Метод исследования** – аналитический метод матрицанта, разработанный профессором С.К. Тлеукуновым. В основе метода лежит построение фундаментального решения исходной системы дифференциальных уравнений. Внутренняя симметрия матрицы коэффициентов позволяет получить все элементы матрицанта в случае однородных сред в явном аналитическом виде. Относится к математическим методам изучения фундаментальных решений систем обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами.

**Научная новизна.** В диссертации получены следующие новые результаты:

– Получены матрицы коэффициентов для пьезоэлектрических сред тетрагональной и ромбической симметрии в трехмерном и двумерном случаях распространения без использования предположения о квазистатичности электрических полей. Получены аналитические выражения для волновых векторов в однородной пьезоэлектрической среде тетрагональной и ромбической симметрии; построены поверхности волновых векторов и фазовых скоростей связанных электроупругих волн.

– Теоретически и экспериментально исследованы углы анизотропного сноса потока энергии (углы между фазовой и групповой скоростями) для SH-волн. Впервые получено явное аналитическое выражение для угла сноса в пьезоэлектриках ромбической симметрии. Рассчитаны групповые скорости, анизотропия плотности потока упругой энергии от линейного источника SH-волн.

– Аналитически решена задача отражения-преломления электромагнитной волны на границе жидкость-пьезоэлектрик, проведен численный анализ решения. Показано, что электромагнитная волна возбуждает упругие волны и рассчитаны энергетические коэффициенты трансформации в зависимости от угла падения.

– Исследованы потоки акустических полей при отражении и преломлении поперечно-горизонтальных упругих волн на границе диэлектрик-пьезоэлектрик. Показано, что в сильноанизотропных пьезоэлектриках в зоне вогнутости поверхности волновых векторов наблюдается двойное лучепреломление упругой волны без изменения волной ветви, предсказанное М.К. Балакиревым и И.А. Гилинским.

– Аналитически определены условия существования и характеристики поверхностных акустических волн Гуляева-Блюстейна (скорость, коэффициенты спадания) для пьезоэлектрического полупространства



ромбической и тетрагональной симметрии с металлизированной и свободной поверхностью.

– Впервые получены выражения для показателей спадания поля поверхностной электромагнитной волны в среде и в вакууме на основе полной системы уравнений Максвелла, решаемой совместно с уравнением движения для упругой среды.

#### **Теоретическая и практическая значимость полученных результатов**

Полученные теоретические результаты имеют важное значение для развития теоретических основ кристаллоакустики пьезоэлектриков. Результаты могут быть применены для расчетов при конструировании различных приборов и устройств в акустоэлектронике и в акустооптике, разных фильтров и сенсоров на ПАВ, а также различных чувствительных элементов, воспринимающих механические и электромагнитные воздействия.

**Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами.** Представленная работа дополняет научно-исследовательские работы других авторов в области решения задач кристаллоакустики и акустоэлектроники другими методами. Часть диссертационной работы выполнена по теме программы фундаментальных исследований в области естественных наук под научным руководством д.ф.-м.н., профессора Тлеукунова С.К.: «Распространение связанных упругих и электромагнитных волн в средах с пьезоэлектрическим эффектом для гексагональной, тетрагональной, ромбической и моноклинной сингонии» в ЕНУ им.Л.Гумилева, по приоритету: Интеллектуальный потенциал страны, на 2012-2014 годы, гос. рег. № 0112РК02379.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

– Матрицы коэффициентов для пьезоэлектрических сред, полученные в работе без использования квазиэлектростатического приближения, показывают связь и взаимную трансформацию энергии между волнами различной поляризации и физической природы. Метод матрицанта позволяет рассчитать угол сноса, групповые скорости, показатель концентрации потока упругой энергии.

– Использование полной акустоэлектромагнитной теории к задаче отражения-преломления электромагнитной волны на границе жидкость-пьезоэлектрик позволяет описать возбуждаемые при отражении упругие волны.

– В зоне вогнутости поверхности волновых векторов сверхсильного пьезоэлектрика ниобата калия реализуется двойное лучепреломление упругой волны без изменения ветви.

– Полученные условия существования поверхностных акустических волн Гуляева-Блюстейна на металлизированных и свободных границах позволяют определить характеристики этих волн (скорость, показатель спадания, коэффициент электромеханической связи) в аналитическом виде. Показатели спадания ЭМ волны в пьезополупространстве и в вакууме для волн Гуляева-Блюстейна невозможно получить в рамках квазиэлектростатического подхода.

### **Личный вклад соискателя.**

Постановка задачи, идея и методы решения принадлежат профессору С. Тлеукинову. Обсуждение полученных результатов были проведены совместно с научными консультантами. Автор принимал непосредственное участие во всех исследованиях, представленных в работе, разработал алгоритмы для символьных и численных расчетов самостоятельно.

**Апробация работы.** Результаты, полученные в работе, докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях: «Инновационное развитие и востребованность науки в современном Казахстане» (Алматы, 2011), «Актуальные проблемы современной физики» посвященная 80-летию профессора И.С. Исатаева (Алматы, 2012), «Таймановские чтения-2012» посвященная 95-летию академика А.Д. Тайманова (Уральск, 2012), «Функциональный анализ и его приложения» (Астана, 2012), Conference of the Asian consortium on computational materials science (Sendai, 2012; Thailand, 2013; Astana, 2014), International workshop on Radiation effects in insulators and non-metallic materials (REINM, Astana, 2014), IEEE International ultrasonic symposium (Joint UFFC, EFTF and PFM, Prague, 2013), на всероссийской научной школе-семинаре «Физика и применение микроволн» (Москва, 2013), на семинаре кафедры технической физики ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, на объединенном семинаре кафедр КарГУ им. ак. Е.А. Букетова.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 14 научных работ, в том числе 4 в изданиях из Перечня, утвержденного Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК, 1 в изданиях, входящие в базу данных Scopus, одно авторское свидетельство.

**Структура и объем диссертации.** Общий объем диссертации – 102 страниц компьютерного текста, содержит 39 рисунков, 6 таблиц. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка цитированных источников из 129 наименований и приложения.

### **Краткое содержание работы.**

*Во введении* рассмотрено современное состояние проблемы, обоснована актуальность темы, цель работы, задачи, объект, предмет и метод исследования, научная новизна диссертации, теоретическая и практическая значимость, связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами, положения, выносимые на защиту.

*В первой главе* диссертации приведены основные уравнения, описывающие связанные акустические и ЭМ волны в пьезоэлектрических материалах. На основе применения метода разделения переменных уравнения движения упругих анизотропных сред и уравнения Максвелла приведены к эквивалентной системе уравнений первого порядка. Устанавливается структура матриц коэффициентов системы уравнений в зависимости от класса симметрии (тетрагональная и ромбическая) пьезоупругих сред и направления координатной оси ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), вдоль которой параметры среды в общем случае неоднородны. Рассматриваются объемный случай распространения волн и распространение в координатных плоскостях. Проанализированы типы волн распространяющихся в данных средах и связи между ними. Обоснована

применимость и преимущества метода матрицанта для решения поставленных задач.

*Во втором разделе* получены аналитические значения волновых векторов в зависимости от азимутального угла и построены поверхности волновых векторов акустоэлектромагнитных волн. Получены аналитические значения угла сноса между фазовой и групповой скоростями для пьезоэлектриков тетрагональной и ромбической симметрии, определены групповые скорости, рассчитаны плотности потока упругой энергии, построены графики показателя концентрации упругой энергии, которые согласуются с экспериментальными данными.

*В третьем разделе* рассматриваются задачи отражения и преломления электромагнитной волны на границе жидкость-пьезоэлектрик, упругой SH волны на границе диэлектрик - пьезоэлектрик. Показано, что падающая ЭМ волна возбуждает упругие волны в анизотропных пьезосредах. Численно рассчитаны относительные энергии преломленной и трансформированной энергий. Проводится анализ компонентов матрицы  $\mathbf{G}$ , описывающие относительные амплитуды смещения, сдвига, электрической и магнитной составляющей отраженной связанной волны. Рассмотрена задача двойного лучепреломления упругой волны без изменения ветви на границе полупространств диэлектрика с пьезоэлектриком ниобатом калия. Рассчитаны и построены графики зависимости энергетических коэффициентов отражения и преломления, векторная диаграмма волновых фронтов и показатель концентрации упругой энергии в зависимости угла преломления для двух ветвей преломления.

*В четвертом разделе* аналитически получены условия существования поверхностных акустических волн Гуляева-Блюстейна на границе пьезоэлектрического полупространства ромбической и тетрагональной симметрии при металлизированных и свободных границах. Методом матрицанта получены аналитические значения скорости распространения, показателя спадания, глубины проникновения и коэффициент электромеханической связи ПАВ Гуляева-Блюстейна в кристаллах тетрагональной и ромбической симметрии на свободной и металлизированной поверхности в направлениях: X-срез, Y-направление и Y-срез, X-направление. Также рассчитаны значения характеристик при повороте среза вокруг оси Z. Рассчитаны значения показателей спадания для поверхностной электромагнитной волны в среде и в вакууме. Анализировано влияние изменения электрической проводимости металлизированной поверхности на характеристики ПАВ Гуляева-Блюстейна.

*В заключении* формулируются основные выводы по полученным в диссертации результатам.

### **Обзор литературы**

Вопросам физики пьезокристаллов и их практическим применениям посвящен ряд статей и книг известных ученых и инженеров по описанию волн в пьезоэлектрических средах, как П. Мэзон [4], Б. Олд [5], У. Кэди [13], и др. [3, 9].

В настоящее время широко применяются устройства, основанные на пьезоэлектрическом эффекте. Линии задержки и кварцевые резонаторы для стабилизации частоты хорошо известные примеры применения ультразвуковых волн в радиоэлектронных системах обработки и передачи информационных сигналов [9-11]. В ограниченных пьезоэлектриках есть возможность существования сдвиговых поверхностных акустических волн (ПАВ) Гуляева-Блюстейна [10, 78-88]. Они не могут распространяться в кристаллах не обладающих пьезоэффектом, открыты относительно недавно. Глубина проникновения ПАВ Гуляева-Блюстейна на много превышает глубину проникновения ПАВ Рэлея, это существенно снижает влияние поверхностного слоя, его неоднородности и дефектов [10]. Принцип устройств на ПАВ основано на том, что ПАВ распространяются вдоль поверхности среды и можно обеспечить контакт с ними, влиять на них, усиливать, преобразовывать на всем пути их распространения. Поэтому, в последние три десятилетия активно ведутся работы по созданию и усовершенствованию устройств на ПАВ.

Другим очень важным направлением современного приборостроения является создание различных датчиков, работающих в контакте с жидкостью. Как известно, акустические волны с поперечно-горизонтальной (SH-shear horizontal) поляризацией могут распространяться в контакте с жидкостью без существенных радиационных потерь, связанных с излучением упругой энергии в жидкость. Эти особенности позволяют создавать на основе таких волн различные датчики для измерения параметров жидкости. Кельчинский, Kondoh и др. с соавторами на протяжении последних 10 лет занимаются разработкой датчиков на ПАВ Г-Б для контроля за качеством сока, вязкости нефти, для обнаружения различных химических примесей в жидкости и т.д. Принцип работы этих устройств основан на акустоэлектрическом взаимодействии упругих волн с носителями заряда, присутствующими в исследуемых жидкостях. Очевидно, что, как и в случае тонкого проводящего поверхностного слоя, чувствительность таких датчиков будет существенно зависеть от коэффициента электромеханической связи на поверхности [89-92].

Большинство работ в области описания упругих волн в пьезоэлектриках посвящено численному исследованию в квазистатическом приближении. Связанность механических и электрических полей и анизотропия вносят дополнительные трудности в анализ задач пьезоупругости. При квазистатическом описании волн матрицей Грина-Кристоффеля (4x4) уравнения приводят к тому, что отсутствует традиционный для колебательных процессов перекачка энергии с механической в электромагнитную и наоборот [3, 93].

Обозримые аналитические решения задачи зачастую можно найти лишь для некоторых конкретных условий, например, для определенного среза кристаллографической оси. Однако они представляются более ценными по сравнению с численными решениями, поскольку позволяют глубже понять физические процессы, протекающие при волновых процессах в пьезоэлектриках. Становятся возможным проследить связь процесса взаимной

трансформации упругой и электромагнитной энергии в пьезоэлектрических анизотропных средах.

Изучение процессов отражения и преломления электроупругих волн на границе пьезоэлектриков остается актуальным, они используются в контроллерах частоты. Задачи отражения и преломления, численно-экспериментальные исследования упругих волн на границе двух полупространств изучаются в [94-100]. Однако в рамках стандартного квазистатического приближения невозможно проследить все детали и связи процесса взаимной трансформации энергий упругой и электромагнитной волн. Например, при решении задачи отражения и преломления между двумя пьезоэлектриками X. Yuan, Z.H. Zhu вместо электромагнитной волны вводят виртуальные волновые моды с нулевой энергией [96, 97]. Задачи отражения и преломления с учетом электромагнитных полей аналитически решаются в [68, 98-103].

В 1979 г. был предсказан М.К. Балакиревым и И.А. Гилинским возможность существования эффекта двойного лучепреломления и лучеотражения упругих волн без изменения ветви на границе гипотетических кубических пьезокристаллов с квадратом коэффициента электромеханической связи, превышающим  $1/3$  [2], но такие кубические кристаллы еще не найдены.

Слабо изучены пьезоэлектрические кристаллы, относящиеся к низкой симметрии. Научный интерес вызывают пьезоэлектрики с высоким коэффициентом электромеханической связи и классом анизотропии, как перовскитные сегнетопьезокерамики ((Na,K)NbO<sub>3</sub>, LiNbO<sub>3</sub>, BiScO<sub>3</sub>, PbTiO<sub>3</sub>, PZT-5H, и др.) [104-105]. Ниобат калия (KNbO<sub>3</sub>) – пьезоэлектрический кристалл ромбической симметрии класса mm2, в литературе его называют «сверхсильным пьезоэлектриком» [106-108]. Относительно недавно из кристалла КТР (KTiOPO<sub>4</sub>) синтезирован пьезоэлектрический кристалл ромбической симметрии с высокой термостабильностью КТА (KTiOAsO<sub>4</sub>), который представляет интерес в качестве элемента на ПАВ в высокотемпературных условиях эксплуатации [109, 110].

Для конструирования акустоэлектронных и акустооптических устройств из сильноанизотропных кристаллов важно учитывать угол сноса и коэффициент фононной фокусировки акустической энергии [111, 112].

В работе, в качестве объекта исследования определены связанные упругие и электромагнитные волны в пьезоэлектриках тетрагональной и ромбической симметрий. Для примера показаны расчеты для определенных кристаллов, таких как, ниобат калия, КТА, КТР и др. Полученные формулы применимы и для других пьезосред ромбической или тетрагональной симметрии.

## ANNOTATION

of thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the specialty 6D060400 – Physics

NURKHAT K. ZHAKIEV

### **Study the electromagnetic and acoustic wave fields in anisotropic piezoelectric media using matricant method**

#### **Topicality of the Work.**

Theoretical study the propagation processes of elastic waves in anisotropic media with different physical properties, such as the piezoelectric effect, and others, is one of the fundamental problems of the acoustics waves in solids, in particular acoustoelectronics. This topic included into priority researches of the Program Forced Industrial-Innovative Development of Kazakhstan for 2010-2014 years.

Various physical effects associated with the propagation and interaction of elastic waves in condensed media are found wide application in devices of acoustoelectronics, acousto-optic, wireless communication systems, ultrasonic defectoscopy, acoustic microscopy, and in development of sensors and transducers.

Existence the direct and inverse piezoelectric effects in dielectric media leads to the coupled and mutual generation of elastic and electromagnetic waves. Coupledness piezoelastic waves are complicated this problem, so approximate methods are used. In the quasistatic approximation impossible to describe the mutual transformation of elastic and electromagnetic wave energy. Therefore, study the coupled acoustoelectromagnetic wave fields in anisotropic piezoelectric media using improved analytical approaches to the full electromagnetic formulation should be considered as one of the complicated, but relevance problems of acoustoelectronics.

In present work - in linear elasticity theory framework and by representation the solutions as a plane waves the coupled acoustoelectromagnetic waves in the cases infinite and half-space piezoelectric anisotropic media are investigated. Theoretical studies were carried out on the basis of a full system of Maxwell's equations with the equation of motion an elastic anisotropic media, as the most rigorous description.

Part of this dissertation was performed in grant funding for research on the 2012-2014 years: "Propagation of coupled elastic and electromagnetic waves in media of hexagonal, tetragonal, rhombic and monoclinic syngony" ID number: 0112RK02379 principal investigator by S.K. Tleukenov.

The **aim** of the work on theoretical research of the coupled acoustic and electromagnetic wave fields in the infinite and semi-infinite tetragonal and orthorhombic piezoelectric media using the full Maxwell's equations using matricant method.

The **object** of the study are the coupled elastic and electromagnetic waves in the cases infinite and semi-infinite tetragonal and orthorhombic piezoelectric media.

**Research method** – the analytical matricant method, had been developed by Professor S.K. Tleukenov. Method is based on the building the structure of the fundamental solution the initial of differential equations system. Internal symmetry in coefficients matrix allows to obtain the all elements of matricant for homogeneous media in explicit analytic form. One of the mathematical methods of studying the fundamental solution of ordinary differential equations system with variable coefficients.

**Scientific novelty** consists from following research results:

- The coefficients of matrices for wave propagation in tetragonal and orthorhombic piezoelectric media in the bulk and two-dimensional cases beyond the quasistatic approximation are obtained. The coefficients matrices was analysed. The analytical form of the wave vector in a homogeneous tetragonal and orthorhombic piezoelectric media are obtained; The slowness and phase velocities curves for coupled electroelastic waves are plotted.

- A theoretical and experimental study the drift (flow) angles between the phase and group velocity. For the first time, an explicit analytical expression of drift angle for the orthorhombic piezoelectrics are obtained. The group velocities, the phonon focusing factor of elastic energy are calculated.

- The problem of the reflection-refraction of electromagnetic waves at the liquid-piezoelectric boundaries are analytically solved and numerical analysed. It was shown that the electromagnetic wave excites elastic waves and calculated the energy transformation ratios depending on incidence angle.

- The acoustic wave fields for the reflection and refraction problem of the shear-horizontal wave at the boundary between insulator and piezoelectric media are studied. It was shown that in high anisotropic and strong piezoelectrics in the concave area of the slowness curve the birefringence of acoustoelectrical waves in piezocrystals with polarization unchanged is observed, it was predicted by M.K. Balakirev and I.A. Gilinsky.

- The existence conditions and the characteristics of the Bleustein-Gulyaev surface acoustic waves, such as the speed, the decay factor for the piezoelectric half-space of orthorhombic and tetragonal symmetry in metalized and free boundaries cases are analytically obtained.

- Firstly the decay factor for surface electromagnetic waves in the media and in the vacuum was obtained after use the full Maxwell's equations system and equations of motion.

### **The provisions for the defense.**

- The obtained matrix of coefficients for piezoelectric media beyond the quasi-static approximation show the relationship and mutual transformation of energy between waves of different polarization and physical nature. Power flow angle is determined by only the piezoelectric parameters of the media. Matriciant method allows to calculate the group velocity, the phonon focusing factor of elastic energy;

- Using full acoustoelectromagnetic theory to the problem of the reflection-refraction of electromagnetic waves at the boundary between liquid and piezoelectric able to describe the excited elastic waves;

- In the concave area of the slowness curve of the superstrong piezoelectric (potassium niobate) the birefringence of acoustoelectric waves with unchanged polarization is possible.

- conditions for the existence of the Bleustein -Gulyaev surface acoustic waves for metallized and free boundaries allow to determine the wave characteristics (speed, rate of decrease, electromechanical factor) in analytical form. The decay factor of the electromagnetic waves in piezohalf-space and in the vacuum for Bleustein-Gulyaev waves impossible obtaine in the quasi-static approach framework.

**The structure and scope of the dissertation.** The total volume of the dissertation 102 pages in computer text, contains 39 figures, 6 tables. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of cited sources 129 and one application.

**Approbation of the work and publications.** The main results of the thesis were published in 14 publication, there are: 4 articles in the journals, recommended by Committee of control of education of Ministry of Education and Science of Kazakhstan, 1 in the journals reviewed by the Scopus database, and one patent №1747, IS0013171 from 15.09.2014.

### **Theoretical and practical significance.**

In this work the effectiveness of the matriciant method for solving the problems of acoustoelectronics and acousto-optics by using full dynamical theory are shown. The results are importance for the development of the theoretical foundations the acoustic of piezoelectric crystals. The results can be used for calculations in the various devices designing in acoustoelectronic and acoustooptic.



## АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD)  
6D060400 – Физика

ЖАКИЕВ НУРХАТ КУАНДЫКОВИЧ

### **Изучение электромагнитных и акустических волновых полей в анизотропных пьезоэлектриках методом матрицанта**

**Актуальность темы.** Теоретическое изучение распространения упругих волн в анизотропных средах с различными физическими свойствами, такими как пьезоэффект и др., является одной из фундаментальных задач акустики твердого тела и, в частности, акустоэлектроники. Входит в перечень приоритетных направлений исследования Государственной программы по форсированному индустриально-инновационному развитию Республики Казахстан на 2010 – 2014 годы.

Разнообразные физические эффекты, связанные с распространением и взаимодействием упругих волн в конденсированных средах, нашли широкое применение в различных устройствах акустоэлектроники и акустооптики, в беспроводных системах связи, в ультразвуковой дефектоскопии, акустической микроскопии и в разработке чувствительных элементов и датчиков.

Наличие в диэлектрической среде прямого и обратного пьезоэффектов приводит к взаимосвязанности и взаимной генерации упругих и электромагнитных волн. Но связанность пьезоупругих волн существенно усложняет задачу, вследствие чего для их анализа широко применяются приближенные методы. Однако в рамках стандартного квазистатического приближения невозможно проследить все детали и связи процесса взаимной трансформации энергий упругой и электромагнитной волн. Поэтому изучение связанных акустоэлектромагнитных волновых полей в анизотропных пьезоэлектрических средах с применением улучшенных аналитических методов и в полной электромагнитной постановке представляет собой сложную, но актуальную задачу современной акустоэлектроники.

В настоящей работе в рамках линейной теории упругости и на основе представления решения в виде плоских волн изучаются особенности распространения взаимосвязанных акустоэлектромагнитных волн в безграничных и полубезграничных пьезоэлектрических анизотропных средах. Теоретические исследования проводятся на основе полной системы уравнений Максвелла, решаемой совместно с уравнениями движения для упругой анизотропной среды, что представляет собой наиболее полное описание связанных волновых полей.

Часть диссертации выполнена в рамках программы фундаментальных исследований в области естественных наук по теме: «Распространение связанных упругих и электромагнитных волн в средах с пьезоэлектрическим

эффектом для гексагональной, тетрагональной, ромбической и моноклинной сингонии» на 2012-2014 годы, гос. рег. № 0112РК02379 под руководством профессора С.К. Тлеукунова.

**Целью работы** является проведение анализа распространения связанных акустических и электромагнитных волновых полей в безграничных и полуограниченных пьезоэлектрических средах тетрагональной и ромбической симметрии с использованием полной системы уравнений Максвелла на основе использования метода матрицанта.

**Объектом исследования** являются связанные акустические и электромагнитные волны в пьезоэлектриках тетрагональной и ромбической симметрий.

**Метод исследования** – аналитический метод матрицанта, разработанный профессором С.К. Тлеукуновым. В основе метода лежит построение фундаментального решения исходной системы дифференциальных уравнений. Внутренняя симметрия матрицы коэффициентов позволяет получить все элементы матрицанта в случае однородных сред в явном аналитическом виде. Относится к математическим методам изучения фундаментальных решений систем обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами.

В диссертации получены следующие **новые результаты**.

– Получены матрицы коэффициентов для пьезоэлектрических сред тетрагональной и ромбической симметрии в трехмерном и двумерном случаях распространения без использования предположения о квазистатичности электрических полей. Получены аналитические выражения для волновых векторов в однородной пьезоэлектрической среде тетрагональной и ромбической симметрии; построены поверхности волновых векторов и фазовых скоростей связанных электроупругих волн.

– Теоретически и экспериментально исследованы углы сноса между фазовой и групповой скоростями. Впервые получено явное аналитическое выражение для угла сноса в пьезоэлектриках ромбической симметрии. Рассчитаны групповые скорости, анизотропия плотности потока упругой энергии от линейного источника SH-волн.

– Аналитически решена задача отражения-преломления электромагнитной волны на границе жидкость-пьезоэлектрик, проведен численный анализ решения. Показано, что электромагнитная волна возбуждает упругие волны и рассчитаны энергетические коэффициенты трансформации в зависимости от угла падения.

– Исследованы потоки акустических полей при отражении и преломлении поперечно-горизонтальных упругих волн на границе диэлектрик-пьезоэлектрик. Показано, что в сильноанизотропных пьезоэлектриках в зоне вогнутости поверхности волновых векторов наблюдается двойное лучепреломление электроупругой волны без изменения волновой ветви, предсказанное М.К. Балакиревым и И.А. Гилинским.

– Аналитически определены условия существования и характеристики поверхностных акустических волн (ПАВ) Гуляева-Блюстейна: скорость, коэффициенты спадания для пьезоэлектрического полупространства ромбической и тетрагональной симметрии с металлизированной и свободной поверхностью.

– Впервые получены выражения для показателей спадания поля поверхностной электромагнитной волны в среде и в вакууме на основе полной системы уравнений Максвелла, решаемой совместно с уравнением движения для упругой среды.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

– Матрицы коэффициентов для пьезоэлектрических сред, полученные в работе без использования квазиэлектростатического приближения, показывают связь и взаимную трансформацию энергии между волнами различной поляризации и физической природы. Метод матрицанта позволяет рассчитать угол сноса, групповые скорости, показатель концентрации потока упругой энергии.

– Использование полной акустоэлектромагнитной теории в задаче отражения-преломления электромагнитной волны на границе жидкость-пьезоэлектрик позволяет описать возбуждаемые при отражении упругие волны.

– В зоне вогнутости поверхности волновых векторов сверхсильного пьезоэлектрика ниобата калия реализуется двойное лучепреломление упругой волны без изменения ветви.

– Полученные условия существования поверхностных акустических волн Гуляева-Блюстейна на металлизированных и свободных границах позволяют определить характеристики этих волн (скорость, показатель спадания, коэффициент электромеханической связи) в аналитическом виде. Показатели спадания ЭМ волны в пьезополупространстве и в вакууме для волн Гуляева-Блюстейна невозможно получить в рамках квазиэлектростатического подхода.

**Структура и объем диссертации.** Общий объем диссертации – 102 страниц компьютерного текста, содержит 39 рисунков, 6 таблиц. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка цитированных источников из 129 наименований и приложения.

**Апробация работы и публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 4 в изданиях из Перечня, утвержденного Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК, 1 в изданиях, входящие в базу данных Scopus, одно авторское свидетельство №1747, ИС0013171 от 15.09.2014.

#### **Теоретическая и практическая значимость.**

В работе показана эффективность метода матрицанта для решения задач акустоэлектроники и акустооптики с применением полной динамической теории. Полученные результаты имеют важное значение для развития теоретических основ кристаллоакустики пьезоэлектриков. Результаты могут использоваться для расчетов при конструировании различных приборов и устройств акустоэлектроники и акустооптики.

6D060400 – Физика мамандығы бойынша философия (Ph.D.) докторы ғылыми дәрежесін алуға ұсынылған диссертацияға

## ТҮЙІН

### **Анизотропты пьезоэлектриктердегі электромагниттік және акустикалық толқындық өрістерді матрицант әдісімен зерттеу**

ЖАКИЕВ НУРХАТ ҚУАНДЫҚҰЛЫ

**Тақырып өзектілігі.** Серпімді толқындардың түрлі физикалық қасиеттерге ие, пьезоэффект т.б. сынды, анизотропты орталарда таралуын теориялық зерттеу қатты дене акустикасының, соның ішінде акустоэлектроника іргелі мәселелерінің бірі болып табылады. Қазақстан Республикасының 2010-2014 жылдарға арналған мемлекеттік үдемелі индустриалды-инновациялық даму бағдарламасының басым бағыттарының біріне енеді.

Серпімді толқындардың конденсирленген орталарда таралуымен және өзара әсерлесуімен байланысты түрлі физикалық эффектілер акустоэлектроника, акустооптика құрылғыларында, сымсыз байланыс жүйелерінде, ультрадыбыстық дефектоскопияда, акустикалық микроскопияда, сезімтал элементтер мен датчиіктер жасауда кең қолданыс тапты.

Тура және кері пьезоэффектінің диэлектриктерде болуы электромагниттік және серпімді толқындардың байлаулылығына және өзара бірін-бірі генерациялауға алып келеді. Бірақ пьезосерпімді толқындардың байлаулылығы есепті едәуір қиындатады, осының салдарынан оларды талдау үшін түрлі жуықтау әдістері қолданылады. Алайда стандартты квазистатикалық жуықтау шеңберінде серпімді және электромагниттік толқын энергиясының өзара трансформациялану үдерісінің байланысын сипаттау мүмкін емес. Сондықтан анизотропты пьезоэлектриктердегі байланысқан электромагниттік және акустикалық толқындық өрістердің таралуын жетілдірілген аналитикалық әдістермен зерттеу қиын есеп болғанымен қазіргі заманғы акустоэлектрониканың өзекті есебі.

Жұмыста сызықтық серпімділік теориясы шеңберінде және шешімдерді жазық толқын ретінде сипаттау негізінде шексіз анизотропты пьезоорталарда және шекаралық шарттары болған жағдайда өзара байланысқан акустоэлектромангниттік толқындардың таралу ерекшеліктері зерттеледі. Теориялық зерттеулер бірлескен Максвелл теңдеулері мен серпімді орта үшін қозғалыс теңдеулері негізінде жүргізілді. Осы тұрғы байлаулы толқындық өрістердің мейілінше толық сипаттамасы болып табылады.

Диссертация кейбір бөлігі 2012-14 жж. арналған жаратылыстану ғылыми саладағы іргелі зерттеулерді гранттық қаржыландыру: «Пьезоэлектрлік қасиеті бар гексагональ, тетрагональ, ромб және моноклин сингонилы орталарда өзара байланысқан серпімді және электромагниттік толқындардың таралуы» атты мем.тірк. №0112РК02379 жобасының аясында профессор С.К. Тлеуқенов жетекшілігімен орындалды.

**Жұмыс мақсаты.** Матрицант әдісі негізінде шексіз және жартылай шектеулі тетрагональді және ромбты симметриялы пьезоэлектрлік орталарда байлаулы акустикалық және электромагниттік толқындық өрістердің таралуын толық Максвелл тендеулер жүйесін қолдана талдау жасау.

**Зерттеу нысаны.** Тетрагональді және ромб симметриялы пьезоэлектрлік орталардағы байлаулы акустикалық және электромагниттік толқындар.

**Зерттеу әдісі** – С. Тлеукеновпен құрастырылған аналитикалық матрицант әдісі. Әдіс негізінде бастапқы дифференциалды тендеулер жүйесінің іргелі шешімдерінің құрылымын жасау жатыр. Коэффициенттер матрицасының ішкі симметриясы біртекті орталар үшін іргелі барлық матрицант элементтерін аналитикалық түрде алуға мүмкіндік береді. Коэффициенттері айнымалы қарапайым дифференциалдық тендеулер жүйесінің негізгі шешімдерін зерттейтін математикалық әдістерге жатады.

Диссертацияда келесі **жаңа нәтижелер** алынды:

– Электр өрістерін квазисатикалық жуықтаусыз үшөлшемді және екіөлшемді жағдайларда тетрагональ және ромб симметриялы пьезоэлектрлік орталардағы толқындар үшін коэффициенттер матрицасы алынды. Тетрагональ және ромб симметриялы біртекті пьезоорталарда таралатын толқындық векторының аналитикалық мәні алынды; байлаулы электросерпімді толқындардың толқындық векторлар мен жылдамдықтар графигі тұрғызылды.

– Фазалық және топтық жылдамдықтар арасындағы ығысу бұрышы теориялық және тәжірибелік зерттелді. Алғашқы рет ромб симметриялы пьезоэлектриктер үшін ығысу бұрышының аналитикалық түрі алынды. Топтық жылдамдық пен серпімді энергияның концентрация көрсеткіші есептелді.

– Сұйық пен пьезоэлектрик арасында шағылу-сыну есебі аналитикалық шешілді, сандық есептеу жүргізілді. Электромагниттік толқын серпімді толқын тудыратыны көрсетіліп, түсу бұрышына байланысты трансформацияның энергетикалық коэффициенттері есептелді.

– Диэлектрик пен пьезоэлектрик шекарасында көлденең-горизонталь серпімді толқынның диэлектрик-пьезоэлектрик шекарасында акустикалық өрісі ағынының шағылу және сынуы зерттелді. Күшті анизотропты пьезоэлектриктерде толқындық вектор бетінің ойыс аумағында электросерпімді толқынның тармақ өзгертпестен қосарлана сынуы байқалатыны көрсетілді, оны М.К. Балакирев пен И.А. Гилинский болжаған.

– Аналитикалық түрде шекаралары металданған және бос бет жағдайларында Гуляев-Блюстейн толқынның болу шарттары мен жылдамдық, өшу коэффициенті сынды беттік акустикалық толқындар сипаттамалары ромб және тетрагональ симметриялы пьезоэлектрлі жартылайкеңістік үшін анықталды.

– Алғашқы рет толық Максвелл тендеулерін серпімді ортаның қозғалыс тендеуімен бірге пайдалану нәтижесінде беттік электромагниттік толқынның пьезоортадағы және вакуумдегі өшу көрсеткіштері алынды.

### **Қорғауға ұсынылатын қағидалар.**

– Квазиэлектростатикалық жуықтаусыз алынған коэффициенттер матрицасы пьезоэлектрлік орталардағы поляризациясы және табиғаты түрлі толқындардың байланысын және өзара энергия трансформациясын көрсетеді. Ығысу бұрышы ортаның тек пьезосерпімді параметрлерімен анықталады. Матрицант әдісі топтық жылдамдықты, серпімді энергия концентрациясы көрсеткішін есептеуге мүмкіндік береді.

– Толық акустоэлектромагниттік теорияны сұйық пен пьезоэлектрик шекарасында электромагниттік толқынның шағылу-сыну есебіне пайдалану шағылған толқыннан қоздырылатын серпімді толқындарды сипаттауға мүмкіндік береді.

– Асақушті калий ниобаты пьезоэлектригнің толқындық вектор бетінің ойыс аймақтарында серпімді толқынның тармақ өзгертпестен қосарлана сынуы жүзеге асады.

– Алынған Гуляев-Блюстейн беттік акустикалық толқынының металданған және бос бет жағдайларында болу шарттары толқын сипаттамаларын (жылдамдық, өшу көрсеткіші, электромеханикалық байланыс коэффициенті) аналитикалық түрін анықтауға мүмкіндік береді. Электромагниттік толқынның пьезоортадағы және вакуумдегі өшу көрсеткіштері квазистатикалық жуықтау шеңберінде алынбайды.

**Диссертация көлемі мен құрылымы.** Диссертацияның жалпы көлемі 102 бет, 39 сурет, 6 кесте бар. Диссертация кіріспеден, 4 тарудан, түйіннен, 129 атауы бар қолданылған әдебиеттер тізімінен және қосымшадан тұрады.

**Басылымдар мен жұмыс апробациясы.** Диссертациялық жұмыс тақырыбы бойынша 14 ғылыми жұмыс, соның ішінде, ҚР БҒМ білім және ғылым саласындағы бақылау Комитеті ұсынған басылымдарда 4, Scopus деректер базасына енетін басылымдарда 1 ғылыми жұмыс жарияланды және 1 авторлық куәлік (№1747, ИС0013171, 15.09.2014) алынды.

### **Теориялық және практикалық маңызы.**

Жұмыста матрицант әдісінің акустоэлектроника және акустооптика есептерін толық динамикалық теорияны пайдалана шешуде эффективтілігі көрсетілді. Алынған нәтижелер теориялық акустоэлектроника мен кристаллоакустиканың дамуы саласында маңызды. Нәтижелер акустоэлектроника мен кристаллоакустиканың түрлі құрылғыларын жасауда есептеулер жүргізуде қолданылуы мүмкін.