

580
ТАГАНРОГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

КАБАРУХИН Юрий Иванович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И
РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АНТЕНН С
ПРИГРАНИЧНЫМИ ПУЗЫРЬКАМИ В ОБЛАСТИ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН НАКАЧКИ

*Специальность 05.11.06. - Акустические
приборы и системы*

АВТОРЕФЕРАТ

*диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук*

У.И. Кабарухин

Таганрог - 1997

Работа выполнена в Таганрогском Государственном радиотехническом университете.

Научный руководитель -
доктор технических наук, профессор,
академик АЕН РФ

В.И.ТИМОШЕНКО (ТРТУ, г.Таганрог).

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

К.В.ФИЛАТОВ (ТРТУ, г.Таганрог).

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

В.П.УСОВ

Ведущая организация указ

Защита состоится "26"
на заседании диссертационного
Государственного радиотехнического
Адрес: 347928, Таганрог I
пер. Некрасовский, 44.

С диссертацией можно ознакомиться

Автореферат разослан "

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент ПЕТРОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

В настоящее время гидроакустические средства приобретают все большее значение для решения задач освоения Мирового океана, являющегося одним из основных источников биологических и минеральных ресурсов. Основным элементом гидроакустической аппаратуры является антенна. Современные достижения в области практических приложений нелинейной акустики ограничиваются, главным образом, параметрическими антеннами, работа которых основана на эффекте генерации низкой частоты при распространении в среде интенсивных высокочастотных волн накачки (ВН). Особенностью параметрических антенн (ПА) является их "бестелесность", т.е. наличие достаточно протяженной области перед излучателем, в пределах которой происходит нелинейное взаимодействие волн накачки. Зона взаимодействия является неотъемлемой составной частью ПА, поэтому всякое изменение свойств среды в этой области, обусловленное, например, наличием различных неоднородностей в виде газовых пузырьков либо пузырьков слоев существенно влияет на характеристики ПА. В этой связи становится актуальной задача исследования влияния пузырьков областей и слоев на характеристики параметрических антенн.

Интерес к исследованиям ПА в средах с высокой акустической нелинейностью обусловлен возможностью использования таких сред для повышения эффективности ПА. Кроме того, возможность использования заданных конфигураций нелинейной области, например, в виде нелинейного пузыркового слоя, значительно расширяет число нелинейных эффектов, возможных в таких системах. Так, например, на нелинейном пузырьковом слое реализуется взаимодействие неколлинеарных звуковых волн, запрещенное условиями синхронизма в акустике однородной среды. Такие взаимодействия могут быть использованы для создания высокоэффективных параметрических излучателей (ПИ) звука с частотным сканированием диаграммы направленности (ДН), а также систем, обрабатывающих волновой фронт акустических волн. Таким образом, исследование нелинейных эффектов, реализующихся на слоях приграничных пузырьков, расположенных в области взаимодействия волн накачки ПИ, представляет интерес как с научной, так и с практической точек зрения.

Целью диссертационной работы являлось

- теоретическое и экспериментальное исследование параметрического излучения, формирующегося при взаимодействии акустических волн на приграничных пузырьках.

Основными задачами исследований являлись:

- разработка методов и создание устройств для формирования стабильных и устойчивых пузырьковых слоев;
- теоретическое рассмотрение влияния пузырьковых слоев на характеристики параметрических антенн;
- разработка методики и экспериментальной установки для проведения исследований;
- экспериментальное исследование влияния слоев приграничных пузырьков на характеристики параметрических антенн и на прохождение через них акустического излучения;
- разработка параметрической антенны с приграничными пузырьками и

устройств, использующих эффекты, обусловленные взаимодействием акустических волн на приграничных пузырьках.

Новые научные результаты:

1. Предложен и экспериментально проверен способ повышения энергетической эффективности ПИ звука с сохранением высокой направленности излучения, заключающийся во введении в область взаимодействия волн накачки приграничных пузырьков, формирующихся с помощью электролиза на поверхности токопроводящей звукопроводящей пластины-границы.

2. Предложен и экспериментально опробован способ оперативного управления направленностью параметрического излучения, формирующегося на приграничных пузырьках, заключающийся во введении в область взаимодействия волн накачки ПИ звука токопроводящей звукопроводящей пластины, на которой они образуются, и изменении ее конфигурации.

3. Экспериментально исследована и подтверждена возможность повышения энергетической эффективности ПИ звука со слоем приграничных пузырьков (СПП), работающего в традиционных режимах: самодетектирования, излучения гармонических составляющих волны конечной амплитуды (ВКА), излучения волны разностной частоты (ВРЧ), излучения волны суммарной частоты (ВСЧ).

4. Предложен и экспериментально исследован способ создания звукозатухания и управления звукозатуханием на токопроводящей пластине в жидкости, заключающийся в подаче на нее импульсного электролизного напряжения и изменении его параметров (амплитуды, длительности и скважности импульсов напряжения).

5. Экспериментально исследовано взаимодействие пересекающихся акустических пучков на слое приграничных пузырьков и продемонстрирована возможность использования этого эффекта для сканирования диаграммой направленности ПИ звука со СПП и обращения волнового фронта (ОВФ) акустической волны.

6. Разработаны устройства, использующие эффекты, обусловленные взаимодействием акустических волн на СПП.

7. Разработан, создан и внедрен на ПСЗ "Янтарь" ПИ звука со СПП, входящий в состав высоконаправленного широкополосного низкочастотного излучающего комплекса, применяющегося для измерения характеристик гидроакустических устройств.

Практическая ценность работы.

Создан новый тип устройств с параметрическими излучающими антеннами со СПП в области взаимодействия волн накачки. Работа выполнена на уровне изобретений (Патенты №№ 1796064, 1767522, 1809404, 1838800, 1824648, 1810861, 1796065, 2010262, 2006073, 2011205, 2035769, 2040014, 2057372).

Выполненные в работе экспериментальные исследования нелинейного взаимодействия акустических волн в нелинейном СПП могут быть использованы:

- при создании высокоэффективных параметрических излучателей звука с высокой направленностью и управляемой энергетической эффективностью;
- при создании ПИ звука с управляемой диаграммой направленности;
- при диагностике нелинейных, например, пузырьковых слоев;
- при создании акустических преобразователей спектра акустических сигналов.

Экспериментальные исследования взаимодействия пересекающихся пучков в нелинейном слое иллюстрируют возможность создания ПИ звука с частотным сканированием ДН, а также устройств, использующих обращение волнового фронта и фокусировку звукового пучка.

Экспериментальные исследования затухания звука на СПП могут быть

использованы для создания высокоэффективных резонансных звукопоглощающих систем, позволяющих существенно снизить уровни звукового давления, например, собственных низкочастотных помех носителя, в частности, на дискретных частотах в акустическом обтекателе в месте расположения приемного преобразователя гидроакустической аппаратуры, что повышает ее дальность действия без увеличения уровня излучаемого сигнала, и т.п.

Созданный параметрический излучатель звука со СПП может быть использован для гидроакустических излучающих трактов различного назначения: в рыбопоисковой аппаратуре, в геолокации, в прецизионных эхолотах и гидролокаторах, для передачи широкополосной телеметрической информации, для обеспечения навигации, в качестве измерительных широкополосных излучателей и для многих других важных приложений в подводной акустике.

Внедрение результатов работы.

Полученные в диссертационной работе результаты нашли применение в виде внедрения высоконаправленного широкополосного измерительного параметрического излучателя в составе измерительной установки для измерения характеристик гидроакустических устройств. Экономический эффект от внедрения комплекса составил 1314 тыс. рублей.

Создана и внедрена в учебный процесс на кафедре ЭГА и МТ Таганрогского Государственного радиотехнического университета лабораторная установка по изучению студентами старших курсов параметров ПИ со СПП. Акты внедрения и технико-экономической эффективности созданных приборов представлены в диссертации.

Апробация работы.

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались: на VI межведомственной конференции по новейшим достижениям в морской геологии, Санкт-Петербург, 1994 г.; на III конференции стран СНГ по морской сейсмологии и сейсмометрии, Москва, 1993 г.; на научно-технической конференции стран СНГ по проблемам метрологии гидрофизических измерений, Москва, 1992 г.; на областных научно-технических конференциях, посвященных Дню радио, Ростов-на-Дону, 1991 - 1993 гг.; на IV научно-технической конференции по передаче, приему и обработке сигналов в радиотехнических системах и устройствах, Ростов-на-Дону, 1991 г.; на 30 - 32 научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников Таганрогского радиотехнического института им. В.Д.Калимыкова в 1989 - 1992 гг.; на 27, 28 н/т конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников Калининградского Госуниверситета, 1996, 1997 гг.; на научных семинарах кафедры электрогидроакустической и медицинской техники Таганрогского Государственного радиотехнического университета в 1993 - 1997 гг.

Публикации.

По материалам диссертационной работы опубликовано 27 печатных работ.

Объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов основного текста, заключения, списка литературы, включающего 149 наименований и приложений. Содержание диссертационной работы изложено на 229 страницах; включая 126 страниц машинописного текста, 77 страниц с рисунками, 16 страниц с списком литературы и 10 страниц с приложениями.

В диссертации защищаются следующие научные положения:

- способ повышения энергетической эффективности ПИ звука с сохранением высокой направленности излучения, заключающийся во введении в область

устройств, использующих эффекты, обусловленные взаимодействием акустических волн на приграничных пузырьках.

Новые научные результаты:

1. Предложен и экспериментально проверен способ повышения энергетической эффективности ПИ звука с сохранением высокой направленности излучения, заключающийся во введении в область взаимодействия волн накачки приграничных пузырьков, формирующихся с помощью электролиза на поверхности токопроводящей звукопроводящей пластины-границы.

2. Предложен и экспериментально опробован способ оперативного управления направленностью параметрического излучения, формирующегося на приграничных пузырьках, заключающийся во введении в область взаимодействия волн накачки ПИ звука токопроводящей звукопроводящей пластины, на которой они образуются, и изменения ее конфигурации.

3. Экспериментально исследована и подтверждена возможность повышения энергетической эффективности ПИ звука со слоем приграничных пузырьков (СПП), работающего в традиционных режимах: самодетектирования, излучения гармонических составляющих волны конечной амплитуды (ВКА), излучения волны разностной частоты (ВРЧ), излучения волны суммарной частоты (ВСЧ).

4. Предложен и экспериментально исследован способ создания звукозатухания и управления звукозатуханием на токопроводящей пластине в жидкости, заключающийся в подаче на нее импульсного электрического напряжения и изменения его параметров (амплитуды, длительности и скважности импульсов напряжения).

5. Экспериментально исследовано взаимодействие пересекающихся акустических пучков на слое приграничных пузырьков и продемонстрирована возможность использования этого эффекта для сканирования диаграммой направленности ПИ звука со СПП и обращения волнового фронта (ОВФ) акустической волны.

6. Разработаны устройства, использующие эффекты, обусловленные взаимодействием акустических волн на СПП.

7. Разработан, создан и внедрен на ПСЗ "Янтарь" ПИ звука со СПП, входящий в состав высоконаправленного широкополосного низкочастотного излучающего комплекса, применяющегося для измерения характеристик гидроакустических устройств.

Практическая ценность работы.

Создан новый тип устройств с параметрическими излучающими антеннами со СПП в области взаимодействия волн накачки. Работа выполнена на уровне изобретений (Патенты №№ 1796064, 1767522, 1809404, 1838800, 1824648, 1810861, 1796065, 2010262, 2006073, 2011205, 2035769, 2040014, 2057372).

Выполненные в работе экспериментальные исследования нелинейного взаимодействия акустических волн в нелинейном СПП могут быть использованы:

- при создании высокоэффективных параметрических излучателей звука с высокой направленностью и управляемой энергетической эффективностью;
- при создании ПИ звука с управляемой диаграммой направленности;
- при диагностике нелинейных, например, пузырьков слоев;
- при создании акустических преобразователей спектра акустических сигналов.

Экспериментальные исследования взаимодействия пересекающихся пучков в нелинейном слое иллюстрируют возможность создания ПИ звука с частотным сканированием ДН, а также устройств, использующих обращение волнового фронта и фокусировку звукового пучка.

Экспериментальные исследования затухания звука на СПП могут быть

использованы для создания высокоэффективных резонансных звукопоглощающих систем, позволяющих существенно снизить уровни звукового давления, например, собственных низкочастотных помех носителя, в частности, на дискретных частотах в акустическом обтекателе в месте расположения приемного преобразователя гидроакустической аппаратуры, что повышает ее дальность действия без увеличения уровня излучаемого сигнала, и т.п.

Созданный параметрический излучатель звука со СПП может быть использован для гидроакустических излучающих трактов различного назначения: в рыбопоисковой аппаратуре, в геолокации, в прецизионных эхолотах и гидролокаторах, для передачи широкополосной телеметрической информации, для обеспечения навигации, в качестве измерительных широкополосных излучателей и для многих других важных приложений в подводной акустике.

Внедрение результатов работы.

Полученные в диссертационной работе результаты нашли применение в виде внедрения высоконаправленного широкополосного измерительного параметрического излучателя в составе измерительной установки для измерения характеристик гидроакустических устройств. Экономический эффект от внедрения комплекса составил 1314 тыс. рублей.

Создана и внедрена в учебный процесс на кафедре ЭГА и МТ Таганрогского Государственного радиотехнического университета лабораторная установка по изучению студентами старших курсов параметров ПИ со СПП. Акты внедрения и технико-экономической эффективности созданных приборов представлены в диссертации.

Апробация работы.

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались: на VI межведомственной конференции по новейшим достижениям в морской геологии, Санкт-Петербург, 1994 г.; на III конференции стран СНГ по морской сейсмологии и сейсмометрии, Москва, 1993 г.; на научно-технической конференции стран СНГ по проблемам метрологии гидрофизических измерений, Москва, 1992 г.; на областных научно-технических конференциях, посвященных Дню радио, Ростов-на-Дону, 1991 - 1993 гг.; на IV научно-технической конференции по передаче, приему и обработке сигналов в радиотехнических системах и устройствах, Ростов-на-Дону, 1991 г.; на 30 - 32 научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников Таганрогского радиотехнического института им. В.Д.Калмыкова в 1989 - 1992 гг.; на 27, 28 и т конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников Калининградского Госуниверситета, 1996, 1997 гг.; на научных семинарах кафедры электрогидроакустической и медицинской техники Таганрогского Государственного радиотехнического университета в 1993 - 1997 гг.

Публикации.

По материалам диссертационной работы опубликовано 27 печатных работ.

Объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов основного текста, заключения, списка литературы, включающего 149 наименований и приложений. Содержание диссертационной работы изложено на 229 страницах; включая 126 страниц машинописного текста, 77 страниц с рисунками, 16 страниц с списком литературы и 10 страниц с приложениями.

В диссертации защищаются следующие научные положения:

- способ повышения энергетической эффективности ПИ звука с сохранением высокой направленности излучения, заключающийся во введении в область

взаимодействия волн накачки приграничных пузырьков, формирующихся с помощью электролиза на поверхности токопроводящей звукопроводящей пластины-границы;

- способ оперативного управления направленностью параметрического излучения, формирующегося на приграничных пузырьках, заключающийся во введении в область взаимодействия волн накачки параметрического источника звука токопроводящей звукопроводящей пластины, на которой они образуются, и изменении ее конфигурации;

- экспериментальное подтверждение возможности повышения энергетической эффективности ПИ звука со СПП в режимах: самодетектирования, излучения гармонических составляющих ВКА, излучения ВРЧ, излучения ВСЧ;

- способ создания звукозатухания и управления затуханием звука на токопроводящей пластине в жидкости, заключающийся в подаче на нее импульсного электролизного напряжения и изменении его параметров (амплитуды, длительности и скважности);

- результаты экспериментальных исследований взаимодействия пересекающихся акустических пучков на СПП и демонстрация возможности использования этого эффекта для сканирования диаграммой направленности (ДН) ПИ звука со СПП, обращения волнового фронта и фокусировки акустической волны на СПП;

- результаты экспериментальных исследований влияния слоев приграничных пузырьков в области взаимодействия волн накачки ПИ звука на его характеристики;

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении, **первом** разделе диссертации, обосновывается актуальность ее темы, формулируется ее цель, приводится краткое содержание диссертации по главам.

Второй раздел работы посвящен обзору публикаций по исследованию влияния пузырьков на характеристики ПА. Анализ литературных источников показал, что имеется большое количество работ по изучению характеристик ПА в пузырьковых средах. В то же время публикаций, посвященных исследованию взаимодействия акустических волн на нелинейных слоях, например, пузырьковых, сравнительно мало. Патентный поиск по практическому использованию нелинейных эффектов на пузырьковых слоях в гидроакустике подтвердил отсутствие исследований ПИ звука с СПП в области взаимодействия волн накачки, формирующимися в результате электролиза на поверхности токопроводящих звукопроводящих пластин. Практически не исследованы спектральные и пространственные характеристики ПА с пузырьковыми слоями в области взаимодействия волн накачки. Не исследованы временные зависимости изменения уровня звукового давления (УЗД) в параметрическом излучении, формирующемся на приграничных пузырьках, образующихся с включением электролизного тока. Отсутствуют исследования о влиянии изменения конфигурации электролизной пластины-границы, на которой формируются приграничные пузырьки, на направленность параметрического излучения, формирующегося на них. Недостаточно полно выяснена сущность физических явлений и закономерностей, имеющих место при взаимодействии акустических волн на приграничных пузырьках. Отсутствуют исследования по затуханию звука на приграничных пузырьках, его особенностей и закономерностей. Из известных теоретических моделей наиболее подходящей для описания излучения разностной частоты, формирующегося на пузырьковом слое, является модель, представленная в работе (Назаров В.Е., Сутин А.М. Характеристики параметрического излучателя звука

с пузырьковым слоем в дальней зоне. - Акуст. журн., 1984 т. 30, №6, с. 803-807).

Анализ многочисленных публикаций по вопросам практической реализации устройств на основе нелинейного взаимодействия акустических волн на приграничных пузырьках показал, что имеющиеся в литературе сведения не дают представления о структуре построения и возможностях использования параметрических излучающих трактов с приграничными пузырьками в области взаимодействия волн накачки в традиционных режимах: самодетектирования, излучения гармонических составляющих ВКА, излучения ВРЧ и ВСЧ. В процессе проведения патентного поиска способов или устройств, использующих эффекты, обусловленные взаимодействием акустических волн на приграничных пузырьках, не обнаружено.

На основе проведенного обзора сделан вывод об актуальности и целесообразности исследований по теме диссертационной работы.

В **третьем** разделе представлены результаты теоретического рассмотрения характеристик ПА в режиме излучения ВРЧ. Основным результатом в разделе следует считать разработку номограмм для инженерного расчета диаграмм направленности ПИ с СПП в области взаимодействия волн накачки.

В п. 3.1 из анализа методов расчета характеристик ПИ с приграничными пузырьками была выбрана модель полученная Назаровым В.Е. и Сутиным А.М. в приведенной выше работе. Результаты экспериментальных исследований показали, что эта модель хорошо описывает характеристики излучения разностной частоты, формирующегося на приграничных пузырьках в случае, если пузырьки формируются на достаточно тонкой пластине-границе, толщина h которой много меньше длин волн накачки $\lambda_{1,2}$ в материале пластины $h \ll \lambda_{1,2}$. Пластина с такой толщиной практически звукопрозрачна для высокочастотных волн накачки с частотами ω_1 и ω_2 , и тем более для низкочастотных волн разностной частоты $\Omega = \omega_1 - \omega_2$, формирующихся на приграничных пузырьках, образующихся на этой пластине. В этом случае влиянием пластины можно пренебречь и амплитуда давления в излучении разностной частоты (РЧ) на оси $P_0(R_0)$ и диаграмма направленности $D(\theta)$ такого излучателя определяются известными выражениями:

(1)

$$P_0(R_0) = \frac{P_w}{\sqrt{1 - \left(\frac{k d}{k_i \alpha}\right)^2}}$$

(2)

$$D(\theta) = \exp \left[- \frac{k_i a^2}{2} \frac{\sin^2 \theta}{1 + \left(\frac{k_i a^2}{k d}\right)^2} \right]$$

где

$$P_w = 2A_1 A_2 \frac{\mathcal{E}_s}{2\alpha - \alpha_s} \frac{\Omega^2 a^2}{c^4 \rho R_0} \left\{ 1 - \exp \left[-(2\alpha - \alpha_s) l \right] \right\} \exp(-\alpha_s l) \quad (3)$$

- поле волны разностной частоты на оси, определяемое моделью Вестервельта для пузырькового слоя толщиной l , $A_{1,2}$ - амплитуды звукового давления в волнах накачки, \mathcal{E}_s - параметр нелинейности газожидкостной среды, α_s - коэффициент затухания на пузырьковом слое волны разностной частоты, $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx \alpha$ - коэффициент затухания волн накачки на пузырьковом слое, a - радиус излучателя, c, ρ - скорость звука и плотность в жидкости без пузырьков, R_0 - расстояние на оси от пузырькового слоя до точки наблюдения, $k = \Omega/c$ - волновое число волны разностной частоты, $k_{1,2} = \omega_{1,2}/c$ - волновое число волны накачки, d - расстояние от излучателя накачки до пузырькового слоя.

Выражение (2) использовалось для расчета номограмм. Диапазон изменения параметров при расчетах выбирался характерным для измерительных излучателей, шаг изменения параметров выбирался таким, чтобы можно было провести линейную интерполяцию между двумя точками. В результате вычисления построены номограммы для расчета ширины диаграммы направленности ПИ звука со СПП, расположенном на различных расстояниях от излучателя накачки. Номограммы позволяют в течение короткого времени рассчитать ширину диаграммы направленности ПИ с различными расстояниями до СПП. Номограммы позволяют судить о закономерностях процессов генерации ВРЧ. Например, видно, что направленность ПИ с СПП с увеличением расстояния от излучателя до СПП возрастает, что обусловлено увеличением ширины "засвеченной" области слоя.

В п. 3.2 рассматривается взаимодействие пересекающихся акустических волн на приграничных пузырьках. Показано, что озвученным участком пузырькового слоя симметрично, вперед и назад, излучается волна разностной частоты Ω под углом θ_3 , который определяется условием синхронизма в плоскости слоя

$$k_1 \sin \theta_1 - k_2 \sin \theta_2 = K \sin \theta_3 \quad (4)$$

где $k_{1,2}, K$ - волновые числа волн накачки и волны разностной частоты, θ_1, θ_2 - углы падения на СПП первичных волн. Изменяя соотношения первичных частот ω_1, ω_2 , можно менять угол излучения волны разностной частоты и тем самым сканировать диаграммой направленности излучателя.

Указывается на возможность обращения волнового фронта и фокусировки звукового пучка на СПП при взаимодействии в нелинейном слое квазиплоской волны накачки, нормально падающей на него, и сферической сигнальной волны. Из выражения (4) видно, что при $\theta_1 = 0^\circ$, $2\omega_2 = \omega_1$ получается, что $\Omega = \omega_2$, а

$\theta_3 = -\theta_2$, $\theta_3 = \pi + \theta_2$. Волна, формируемая слоем под углом $\theta_3 = -\theta_2$, распространяется в обратном направлении к сигнальной и соответствует волне с обращенным волновым фронтом. Вторая волна, излучаемая под углом $\theta_3 = \pi + \theta_2$, соответствует повороту направления распространения сигнальной

волны. Если сигнальная волна - сферическая, то обе волны будут фокусироваться: первая в точку излучения, вторая - точку, симметричную относительно слоя.

Четвертый раздел посвящен описанию результатов экспериментальных исследований ПА со СПП в традиционных режимах работы и взаимодействия акустических волн на приграничных пузырьках.

В п. 4.1 описывается схема экспериментальной установки, приводятся характеристики и параметры устройств, изготовленных автором.

В п. 4.2 рассматриваются особенности методики проведения экспериментальных исследований, обосновывается конструкция электролизных пластин. Указывается на особое внимание, которое уделялось контролю нелинейности аппаратуры и контрольным экспериментам, позволяющим отделить нелинейные эффекты в среде от нелинейных взаимодействий в аппаратуре.

В п. 4.3 экспериментально подтверждается возможность создания высокоэффективного стабильного параметрического излучения на приграничных пузырьках, исследуются особенности его формирования. Отмечается, что в процессе исследования ПИ с СПП в момент включения электролизного тока был обнаружен аномальный рост на 20 - 40 дБ УЗД в параметрическом излучении разностной частоты, формирующемся на озвученном участке пузырькового слоя.

Увеличение звукового давления в параметрическом излучении связывается с формированием оптимальной структуры слоя, который обладает высокой акустической нелинейностью. Полагается, что поскольку при электролизе скорость роста газовых пузырьков одинакова, то через некоторое время после включения тока практически все пузырьки одновременно достигают одинаковых размеров, резонансных частоте волн накачки. Это подтверждается тем, что в эксперименте одновременно с ростом на 20 - 40 дБ давления в параметрическом излучении комбинационных частот регистрируется уменьшение на 30 - 50 дБ УЗД в ВН, что возможно только в случае резонансного поглощения звука. Т.о., при включении тока на поверхности пластины формируется СПП с высокой нелинейностью, обусловленной, высокой концентрацией практически моноразусных пузырьков, резонансных частоте ВН, которые располагаются в непосредственной близости друг от друга в одной плоскости.

Экспериментально выявлены зависимости УЗД в излучении РЧ, формирующемся на СПП от:

- моментов включения и выключения тока, а также от параметров импульсного тока. Показано, что при кратковременных включениях тока на время, необходимое для достижения максимального УЗД в ВРЧ, осуществляемых с постоянной скважностью, возможно периодическое в моменты включения тока увеличение УЗД в ВРЧ в одно и то же число раз;

- от силы электролизного тока. Показано, что с уменьшением тока рост УЗД в ВРЧ замедляется, уменьшается и его максимальное значение, при этом существует оптимальное значение тока, при котором возросший УЗД в ВРЧ остается практически неизменным в течение сколь угодно длительного промежутка времени, пока на пластину подается постоянное напряжение;

- от газового состава СПП. Показано, что при одинаковой плотности тока излучение РЧ, образующееся на водородных СПП, формируется быстрее и эффективность преобразования энергии ВН в энергию ВРЧ на водородных пузырьках выше, чем на кислородных. В то же время излучение РЧ, формирующееся на кислородных пузырьках, при достижении максимального уровня более стабильно и долговечнее излучения, формирующегося на водородных СПП;

- от толщины электролизной пластины и расположения СПП по отношению к излучателю ВН. Показано, что максимальная эффективность преобразования

энергии ВН в энергию ВРЧ, формирующейся на СПП, реализуется при использовании тонких пластин, толщина которых h много меньше четверти длины волны накачки $\lambda_{1,2}$ в материале пластины: $h \ll \lambda_{1,2}/4$, и на СПП, обращенных к излучателю.

В п. 4.4 исследуется аномально высокое на 40 - 50 дБ затухание звука на СПП, которое объясняется высокой концентрацией резонансных пузырьков в слое, расположенных в непосредственной близости друг от друга в одной плоскости.

Выявлены зависимости затухания звука на СПП:

- от газового состава СПП. Показано, что при одинаковой плотности тока слой водородных пузырьков формируется быстрее, и эффективность звукозатухания на нем на 6 - 8 дБ выше, а слой кислородных пузырьков более стабилен во времени и значительно долговечнее;

- от расположения СПП по отношению к излучателю, и УЗД в зондирующем излучении. Показано, что с уменьшением давления в области СПП затухание звука на СПП увеличивается, этим объясняется рост затухания звука на СПП, отделенных от излучателя пластиной;

- от силы электролизного тока. Показано, что с ростом тока растет скорость формирования оптимальной структуры СПП и величина затухания звука на них;

- от частоты излучения. Показано, что с понижением частоты сигнала возрастает временной интервал, необходимый для формирования оптимальной структуры СПП, а величина затухания звука на них уменьшается;

- от числа электролизных пластин и их толщины. Показано, что с ростом числа пластин затухания звука на системе СПП возрастает. Максимальное затухание звука реализуется на четвертьволновых пластинах, т.е. на пластинах, толщина которых равна четверти длины волны излучения, распространяющихся через них;

- от длительности и скважности импульсов электролизного тока. Показано, что увеличение скважности импульсного тока приводит к уменьшению средней величины затухания на СПП. Подтверждена возможность управления величиной затухания звука на приграничных пузырьках, формирующихся на токопроводящих звукопроводящих электролизных пластинах, за счет управления параметрами импульсного тока, подаваемого на них.

Исследования затухания звука на СПП проводились в широком диапазоне частот от 3 до 300 кГц. Выявлено, что если на высоких частотах (150 - 300 кГц) возможно получение затухания звука на 50 и выше дБ на одном СПП, то для получения такого затухания на НЧ (3 кГц) требовалась система из шести параллельных СПП, "связанных" (пластины перед включением тока покрывались тонким слоем технического масла, что препятствовало преждевременному отрыву пузырьков с поверхности пластин и они достигали размеров, резонансных частоте распространяющегося через них излучения) с электролизными пластинами.

В п. 4.5 экспериментально исследовалась возможность оперативного управления направленностью параметрического излучения, формирующегося на СПП за счет изменения разностной частоты и расстояния от излучателя накачки до СПП. В эксперименте с включением электролизного тока 10 А на поверхности плоской алюминиевой пластины размерами 1 x 1 м, толщиной 1 мм, находящейся на расстоянии длины зоны дифракции для ВН $l^*g = a\omega/2c$ в течение долей секунды образовывался СПП, резонансных средней частоте $\omega = 260$ кГц. В результате рост давления в излучении РЧ 20 кГц составил 22 дБ. Также быстро

в течение долей секунды увеличилась ширина ДН излучения РЧ по уровню 0,7 с 7° в волне РЧ 20 кГц, прошедшей через пластину, до 27° в формировавшемся на приграничных пузырьках излучении.

Экспериментально продемонстрирована возможность управления направленностью параметрического излучения, формирующегося на приграничных пузырьках, образующихся на токопроводящей звукопроводящей пластине, за счет изменения конфигурации пластины.

В п. 4.6 приведены результаты экспериментальных исследований ПИ звука со СПП в режиме самодетектирования. Преобразователь накачки излучал прямоугольные радиоимпульсы длительностью 0,1 мс с частотой заполнения 250 кГц. При самодетектировании импульсов накачки на озвученном участке СПП формировалось широкополосное низкочастотное видеоимпульсное излучение в виде сдвинутых во времени противофазных скачков акустического давления. Регистрация УЗД в спектральных составляющих самодетектированного излучения осуществлялась в реальном масштабе времени в трехоктавных полосах частот с среднегеометрическими частотами от 2 до 80 кГц. С включением электролизного тока был обнаружен рост УЗД в самодетектированном излучении на 6 - 23 дБ во всем контролируемом диапазоне частот.

Выявленные временные зависимости УЗД в спектральных составляющих самодетектированного излучения, формирующегося на СПП, от их газового состава, от силы электролизного тока, от числа СПП и расстояния между ними практически не отличаются от аналогичных зависимостей для ПИ звука с СПП, работающего в режиме излучения ВРЧ.

В п. 4.7 исследовался ПИ с СПП в режиме излучения гармонических составляющих ВКА. Излучались прямоугольные радиоимпульсы длительностью 0,6 мс с частотой заполнения 260 кГц. Звуковое давление в гармонических составляющих ВКА регистрировалось на частотах 520, 780, 1040, 1300 кГц. С включением электролизного тока был обнаружен рост УЗД в гармонических составляющих ВКА, формирующихся на СПП, на 12 - 30 дБ. Рост давления в 3, 4, 5 гармониках сопровождался значительными флуктуациями, вероятно, оптимальная структура СПП для формирования этих гармоник реализуется в течение коротких промежутков времени при включении и выключении тока.

В п. 4.8 обсуждаются результаты экспериментальных исследований ПИ с СПП в режиме излучения ВСЧ. Биения двух колебаний с частотами 250 и 270 кГц излучались в виде радиоимпульсов длительностью 0,5 мс. Включение тока вызывало рост УЗД в ВСЧ 520 кГц, формирующейся на СПП, на 18 дБ. Характер приведенных временных зависимостей изменения УЗД в ВСЧ, формирующейся на СПП, от силы электролизного тока и газового состава СПП сходен с характером изменения аналогичных зависимостей для ВРЧ.

В п. 4.9 приводятся результаты исследования частотного сканирования ДН ПИ звука со СПП, реализующегося при взаимодействии в СПП пересекающихся первичных пучков. В эксперименте угол между акустическими осями первичных излучателей ВН составлял $4,7^\circ$, частота первой ВН составляла 245 кГц, а второй - менялась от 145 до 215 кГц. При этом направление излучения РЧ, формирующегося на СПП, изменялось от 4° до 38° . Отмечается, что с ростом РЧ направленность излучения растет, а угол поворота ДН - уменьшается. Полученные экспериментально зависимости ширины ДН излучения РЧ по уровню 0,7 от частоты и угла поворота ДН от параметра ω_2/ω_1 хорошо согласуются с теоретическими кривыми.

В п. 4.10 экспериментально исследовалось ОВФ акустической волны и фокусировка звукового пучка на СПП при взаимодействии в нем квазиплоской волны накачки с частотой 260 кГц, нормально падающей на слой, и сигнальной

электропроводящей пластиной в жидкости. - Патент РФ № 2057372, Б.И. 1996, № 9.

17. Кабарухин Ю.И. Схемы формирования параметрических излучателей с слоем приграничных пузырьков. - Тез. докл. IV н/т конф. "Передача, прием и обработка сигналов в радиотехнических системах и устройствах", Ростов-на-Дону, 1991, с. 41-42.

18. Кабарухин Ю.И. Высокоэффективное генерирование параметрического излучения в режиме самодетектирования. - Тез. докл. IV н/т конф. "Передача, прием и обработка сигналов в радиотехнических системах и устройствах", Ростов-на-Дону, 1991, с. 35.

19. Кабарухин Ю.И. Экспериментальные исследования параметрического излучателя с нелинейным слоем. - Тез. докл. IV н/т конф. "Передача, прием и обработка сигналов в радиотехнических системах и устройствах", Ростов-на-Дону, 1991, с. 43-44.

20. Кабарухин Ю.И. Параметрический источник звука с нелинейным слоем в области взаимодействия волн накачки. - Тез. докл. н/т конф. стран СНГ ПМГИ-92 "Проблемы метрологии гидрофизических измерений", М.: НПО "ВНИИФТРИ", 27-29 окт. 1992, с. 78-79.

21. Кабарухин Ю.И. Параметрический источник звука с системой нелинейных слоев в области взаимодействия волн накачки. - Тез. докл. III конф. стран СНГ по морской сейсмологии и сейсмометрии, М.: НПО "ВНИИФТРИ", 18-20 мая 1993, с. 97-99.

22. Кабарухин Ю.И. Высокоэффективная звукопоглощающая система пузырьковых слоев в жидкости. - Тез. докл. III конф. стран СНГ по морской сейсмологии и сейсмометрии, М.: НПО "ВНИИФТРИ" 18-20 мая 1993, с. 171.

23. Кабарухин Ю.И. Сканирование диаграммой направленности параметрического излучения. - Тез. докл. Обл. н/т конф., посвящ. Дню радио, Ростов-на-Дону, 1993, с. 33-34.

24. Кабарухин Ю.И. Повышение эффективности обращения волнового фронта акустической волны на пузырьковом слое. - Тез. докл. Обл. н/т конф., посвящ. Дню радио, Ростов-на-Дону, 1993, с. 34-35.

25. Кабарухин Ю.И. Параметрический источник звука с нелинейным слоем в области взаимодействия волн накачки. - Тез. докл. VI межведомств. конф. по новейшим достижениям в морской геологии "Проблемы развития морских геотехнологий, информатики и геоэкологии", Санкт-Петербург, ВНИИОкеанология, 1994, с. 95-96.

26. Кабарухин Ю.И. Способ повышения эффективности обращения волнового фронта акустической волны на пузырьковом слое. Положительное решение о выдаче патента РФ по заявке №5042241/22 от 30.07.1993 г.

27. Кабарухин Ю.И. Устройство для снижения уровня помех в акустическом обтекателе. - Положительное решение о выдаче патента по заявке №9303290/09 от 30.01.1995.

ДЛЯ ЗАМЕТОК