

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Институт физики  
Кафедра общей, теоретической и компьютерной физики

**Экспериментальное исследование зависимости характеристик  
ультразвуковых приёмопередатчиков от частоты, давления, температуры**

**АПВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 4 курса 4022 группы  
направления 03.03.02 «Физика» Института физики  
Нестерова Сергея Михайловича

Научный руководитель  
профессор, д.ф.-м.н.

В. В. Петров

Заведующий кафедрой  
общей, теоретической и  
компьютерной физики  
профессор, д.ф.-м.н.

В.М. Аникин

Саратов  
2024

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Актуальность темы выпускной квалификационной работы (ВКР) обусловлена непрерывным развитием ультразвуковых технологий и увеличением их значимости в современных системах контроля и диагностики. Ультразвуковые приёмопередатчики используются в самых разнообразных областях: от медицинской диагностики и мониторинга состояния здоровья до промышленной дефектоскопии и контроля качества материалов. В условиях растущей потребности в точных и надёжных измерениях разработка и совершенствование ультразвуковых приёмопередатчиков становится особенно важной задачей.

Данная работа направлена на создание комплексного подхода к изучению ультразвуковых приёмопередатчиков, их характеристик и поведения в различных условиях эксплуатации. Результаты исследования будут полезны для совершенствования существующих ультразвуковых систем и разработки новых решений, обеспечивающих высокую точность и надёжность в различных областях применения.

**Цель ВКР.** Целью данной выпускной квалификационной работы ставится проведение всестороннего и углубленного исследования характеристик ультразвуковых приёмопередатчиков и выявление зависимости этих характеристик от различных внешних факторов, таких как частота, давление и температура, выявление того, как эти факторы влияют на эффективность, стабильность и точность работы приёмопередатчиков в различных условиях.

### **Задачи ВКР:**

Изучение теоретических основ и принципов работы ультразвуковых приёмопередатчиков.

Анализ различных параметров и условий, которые могут влиять на их функциональные возможности ультразвуковых приёмопередатчиков, а именно:

анализ влияния частоты на такие параметры, как амплитуда и фаза сигнала, изучение влияния изменения давления на работу ультразвуковых приёмопередатчиков;

анализ влияния температуры на работу ультразвуковых приёмопередатчиков, построение температурной зависимости параметров. Температурные изменения могут значительно воздействовать на работу устройств, и знание этих эффектов необходимо для создания надёжных и точных систем.

Проведение экспериментов для выработки рекомендаций по улучшению конструкции и эксплуатации ультразвуковых систем.

**Объект исследования** – ультразвуковые приёмопередатчики. Предмет исследования – конструктивные и функциональные особенности ультразвуковых приёмопередатчиков.

**Научная новизна** работы – теоретические и практические рекомендации по улучшению функциональных свойств ультразвуковых приёмопередатчиков, их рабочих характеристик.

**Практическая значимость** исследования заключается в возможности использования полученных результатов для разработки и совершенствования ультразвуковых приёмопередатчиков, повышения их точности и надёжности, а также в расширении областей их применения.

**Структура ВКР.** Настоящая работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. В первой главе рассмотрены теоретические основы работы ультразвуковых приёмопередатчиков, их конструкция и принципы действия. Во второй главе проанализированы внешние факторы, влияющие на работу приёмопередатчиков, и методы компенсации этих факторов. В третьей главе представлены основные области применения ультразвуковых приёмопередатчиков и их роль в этих областях.

## СОДЕРЖАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

**Устройство приемопередатчика.** В ходе экспериментов были использованы приемопередатчики «SA-УЗД130Т». С частотой резонанса 130 кГц, и максимальным рабочем давлением 6 МПа (рисунок 1). Для того, чтобы уменьшить погрешность измерений, было использовано несколько пар ультразвуковых приемопередатчиков. Всего было использовано 8 приемопередатчиков (4 пары). Каждый из них имеет на себе серийный номер, название модели, дату изготовления и основные характеристики



Рисунок 1 - приемопередатчики «SA-УЗД130Т»

Ультразвуковой приемопередатчик «SA-УЗД130Т» состоит из пьезокерамического элемента, ультразвукового низкочастотного фильтра и температурного датчика (рисунок 2).

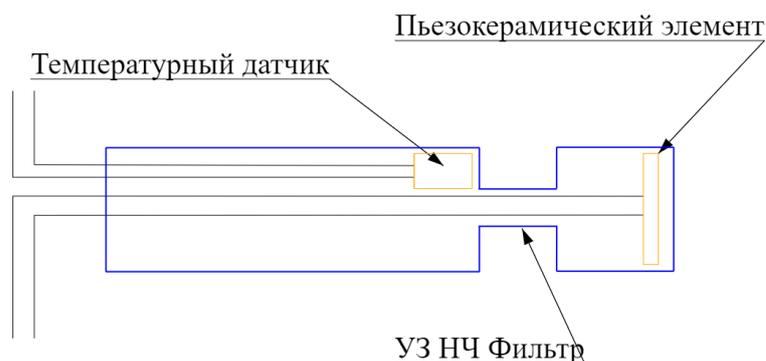


Рисунок 2 – Структура приемопередатчика

Пьезоэлектрические керамические преобразователи позволяют получать ультразвуковые колебания (УЗК) высокой частоты, обеспечивая тем самым лучшую направленность распространения ультразвуковых волн. Кроме пьезоэлектрического эффекта, для получения УЗК широко используется и электростатический метод, реализуемый электростатическими преобразователями. Пьезоэлектрические кристаллы имеют свойство изменять размеры (деформироваться) при воздействии на определённые поверхности кристалла электрического напряжения — таким образом электрическая энергия может быть преобразована в механическую. И наоборот, когда давление прикладывается к внешней поверхности кристалла, образуется заряд, который может быть преобразован в напряжение.

В качестве материалов для пьезоэлектрических кристаллов обычно используются титанат свинца ( $\text{PbTiO}_3$ ) и цирконат свинца ( $\text{PbZrO}_3$ ). Пьезокерамику получают путём спекания пьезоэлектрических микрокристаллов с присадками (связующими веществами). Так как после спекания диполи микрокристаллов располагаются произвольным образом, то полученная керамика поляризуется посредством приложения высокого напряжения при высокой температуре. Благодаря этому вдоль оси поляризации создаётся максимальное растяжение материала. Для упомянутых материалов при воздействии напряжения в несколько сотен вольт оно составляет  $d/l = 10^{-4}$ .

Очень важным при формировании УЗК в воздухе является корректная реализация перехода между ультразвуковым генератором и окружающей воздушной средой: для получения эффективного излучения должна быть создана большая амплитуда колебаний, а для этого необходим «механизм» трансформации, который преобразовал бы небольшую амплитуду изменения параметров конденсатора (электростатический метод) или пьезокерамического элемента (ПКЭ) в большую амплитуду распространяющихся в воздушной среде колебаний.

**Инструменты аналого-цифрового преобразования.** Для успешного проведения экспериментов использовалось несколько ключевых приборов, необходимых для контроля и измерения различных параметров ультразвуковых приемопередатчиков. Среди них основными были цифровой осциллограф «Акип-4107/5» и частотный генератор.

Цифровой осциллограф «Акип-4107/5» является мощным инструментом для

анализа временных характеристик электрических сигналов. Он предоставляет возможность визуализировать и регистрировать сигналы с высокой разрешающей способностью и точностью. Осциллограф позволяет анализировать форму сигналов, искать артефакты и помехи, а также измерять основные параметры сигналов, такие как амплитуда, частота и временные интервалы. Это необходимо для проверки соответствия сигналов заданным техническим требованиям и выявления любых отклонений, которые могут повлиять на работу ультразвуковых приемопередатчиков.

Частотный генератор использовался для задания точной частоты ультразвуковых волн, генерируемых приемопередатчиками. Этот прибор обеспечивает стабильность частоты и точность настройки, что критически важно для проведения экспериментов, требующих работы при определенных частотных режимах. Он позволяет настраивать ультразвуковые приемопередатчики на определенные частоты и проверять их способность к передаче и приему сигналов на заданных частотах.

Использование цифрового осциллографа и частотного генератора в экспериментальных исследованиях ультразвуковых приемопередатчиков обеспечивает необходимую техническую базу для проведения точных измерений и анализа электрических сигналов.

**Температурные испытания и их результаты.** Для проведения температурных испытаний была использована температурная камера (рисунок 3), которая способна создавать область с изначально заданной температурой от -70 до +150 градусов Цельсия. Камера оснащена современной системой управления, что обеспечивает высокую точность испытаний, надежность, и помехоустойчивость, имеет память ранее выставленных параметров, что облегчает ее использование. Контроллер можно подключить к компьютеру и регистрировать процесс испытаний. Также камера оснащена монитором, что позволяет визуально наблюдать за температурой и временем процесса. Есть возможность организовывать циклические испытания.

Имеется также регулировка шага температуры в определённый промежуток времени. Выбор остановился на 1 градусе в 1 минуту, так как для достижения максимально эффективного результата должна охладиться/нагреться не только среда вокруг датчика, но и сам датчик с его монтажной установкой. Эта скорость изменения температуры была выбрана на основе предварительных экспериментов, которые показали, что более быстрые изменения температурного режима приводят к возникновению значительных термальных градиентов в материалах датчика и его монтажной конструкции. Эти градиенты, в свою очередь, могут вызывать деформацию и внутренние напряжения, что отрицательно сказывается на точности измерений и долговечности датчика. При установленном шаге в 1 градус в минуту, теплообмен между средой и датчиком происходит достаточно медленно, чтобы предотвратить возникновение резких температурных скачков. Это обеспечивает равномерное прогревание или охлаждение всех компонентов системы, что критически важно для получения стабильных и повторяемых результатов. Кроме того, такой режим изменения температуры позволяет более точно контролировать

условия эксперимента и исключить возможность повреждения оборудования.

Для реализации данного температурного режима была использована система управления температурой, включающая в себя термостаты, охлаждательные агрегаты и программируемый контроллер, который обеспечивал плавное изменение температуры в заданном диапазоне. Контроллер также осуществлял непрерывный мониторинг текущей температуры, позволяя оперативно вносить корректировки и поддерживать оптимальные условия для проведения экспериментов.

Дополнительно были проведены тесты на долговременную стабильность системы при многократных циклах нагрева и охлаждения. Эти тесты подтвердили, что выбранный температурный режим не оказывает негативного влияния на ультразвуковые приёмопередатчики и их монтажные конструкции, обеспечивая их надёжную работу на протяжении длительного времени. Результаты также показали, что система способна выдерживать экстремальные температуры без ухудшения функциональных характеристик, что открывает возможности для её использования в широком диапазоне промышленных и научных приложений.



Рисунок 3 – Экспериментальная установка

При быстрой смене температурного режима возможен выход из строя ультразвукового приёмопередатчика. Для решения этой проблемы эксперименты с

отрицательной температурой проводились при дальнейшем нагревании элемента естественным путём: выключался охладительный агрегат и путём естественной рециркуляции воздуха в камере происходил нагрев до комнатной температуры. Это позволило избежать выхода из строя датчиков.

Было также установлено, что при быстром охлаждении и последующем резком нагревании в структуре материала датчиков возникают внутренние напряжения, приводящие к микротрещинам и деградации чувствительных элементов. Естественное нагревание позволило минимизировать эти внутренние напряжения, обеспечивая более плавный переход через критические температурные точки и предотвращая разрушение материала.

Во время проведения эксперимента в установке создавались паразитные колебания, которые негативно влияли на выходные данные. Эти колебания были вызваны рядом факторов, таких как механические вибрации от работающего оборудования и акустические резонансы в камере. Чтобы решить проблему – потребовалось создать вибропоглощающую подложку между корпусом датчика и экспериментальным стендом. Подложка была выполнена из вспененного полиэтилена.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

В ходе подготовки ВКР была выполнена всесторонняя оценка характеристик и функциональных возможностей ультразвуковых приемопередатчиков. Основное внимание уделялось анализу работы устройств в различных условиях, а также исследованию влияния внешних факторов на их эффективность и точность измерений.

В рамках работы были рассмотрены следующие ключевые аспекты:

**Теоретические основы работы ультразвуковых приемопередатчиков.** Были изучены принципы распространения ультразвуковых волн, их взаимодействие с различными средами и основные типы волн, используемые в практике. Определены основные параметры, влияющие на работу ультразвуковых систем.

**Конструктивные особенности приемопередатчиков.** Проанализированы основные компоненты устройств, такие как пьезоэлементы, температурные датчики и проводные соединения. Были рассмотрены различные материалы и технологии, используемые при их производстве, а также методы улучшения их характеристик.

**Влияние внешних факторов.** Проведено исследование воздействия температуры, давления и частоты на работу ультразвуковых приемопередатчиков. Определены методы компенсации этих влияний, что позволило улучшить точность и надежность устройств.

Полученные данные могут служить основой для дальнейших исследований и разработок в области ультразвуковых систем.

### Список использованных источников

1. Иванов И.И., Петров П.П. Основы ультразвуковой техники. — М.: Издательство МГУ, 2015.
2. Красильников В.А. Введение в акустику. - Изд-во МГУ, 1992. - 152 с.
3. Харитонов А.В. Электрические схемы-аналоги электроакустических преобразователей.- Л: ЛЭТИ, 1979. – 59 с.
4. Сидоров А.А. Ультразвуковые волны и их применение. — СПб.: Наука, 2016.
5. Кузнецов Н.Н. Пьезоэлектрические материалы для ультразвуковых устройств. — Екатеринбург: УРФУ, 2018.
6. Новиков В.В. Применение ультразвука в медицине и промышленности. — Новосибирск: НГУ, 2017.
7. Тихонов А.А. Современные ультразвуковые технологии. — Казань: КГУ, 2021.
8. Электроакустические преобразователи / В.М. Шарапов и др. -М: Техносфера, 2013. – 296 с.
9. Хансуваров Т.И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня.- М.: Изд-во стандартов, 1990.