УДК 550.8.056

Елкин Иван Сергеевич, доцент, к.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)
Красильников Олег Вадимович, студент гр. ИИб-252, II курс
(КузГТУ, г. Кемерово)
Семке Артем Викторович, студент гр. ИИб-252, II курс
(КузГТУ, г. Кемерово)
Шишкина Анастасия Владимировна, студент гр. ИИб-252, II курс
(КузГТУ, г. Кемерово)
Elkin Ivan Sergeevich, associate professor, Ph.D.
(KuSTU, Kemerovo)
Oleg Vadimovich Krasilnikov, student, 2nd year
(KuSTU, Kemerovo)
Semke Artem Viktorovich, student, 2nd year
(KuSTU, Kemerovo)
Shishkina Anastasia Vladimirovna, student, 2nd year
(KuSTU, Kemerovo)

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR STUDYING THE FREQUENCY DEPENDENCE OF THE ATTENUATION COEFFICIENT OF ACOUSTIC WAVES

Аннотация. Приведены результаты по разработке метода определения коэффициента затухания с использованием современных ИТ-технологий и техники. Представлены результаты исследований зависимостей коэффициента затухания от частоты звуковой волны для широко используемых строительных материалов. Разработка имеет целью как расширения научных представлений об акустических явлениях и технических возможностях современной техники, так и использования в учебных целях.

Abstract. This paper presents the development of a method for determining the attenuation coefficient, utilizing modern IT technologies and equipment. It includes research findings on the dependence of the attenuation coefficient on sound wave frequency for commonly used construction materials. This development aims both to broaden scientific understanding of acoustic phenomena and the technical capabilities of modern equipment, and to serve educational purposes.

Исследование частотной зависимости коэффициента затухания звуковых волн необходимо для оценки акустических свойств материалов, что имеет важное значение в строительстве, машиностроение, технике. Однако специализированное измерительное оборудование отличается высокой стоимостью и ограниченной доступностью. В связи с этим актуальна разработка и экспериментальная проверка мобильного метода исследования с использованием доступных технических средств [1 – 3].

Целью работы является разработка, практическая реализация и экспериментальная проверка доступного мобильного метода определения частотной зависимости коэффициента затухания акустических волн при прохождении через исследуемые материалы, используемые в строительстве.

Распространение акустической волны в реальной среде сопровождается потерями звуковой энергии. Постепенное рассеяние этой энергии приводит к уменьшению амплитуды колебаний по мере продвижения волны, то есть к её затуханию. Основными физическими механизмами этих потерь являются вязкое трение воздуха в порах и внутреннее трение в структуре самого материала.

В пространственной модели изменение амплитуды плоской акустической волны при прохождении слоя материала толщиной x описывается экспоненциальным законом Бугера-Ламберта [4, 5]:

$$A = A_0 e^{-\beta x},$$

где A_0 – амплитуда акустической волны до прохождения через материал; A – амплитуда волны после прохождения через образец; β – пространственный коэффициент затухания волны, см$^{-1}$; x – толщина исследуемого образца, см.

Из данного выражения пространственный коэффициент затухания определяется как:

$$\beta = \frac{1}{x} \ln\left(\frac{A_0}{A}\right).$$

Классическое выражение описывает затухание волны одной частоты, монохроматической. Однако акустические свойства материалов существенно зависят от частоты колебаний. Для полноты анализа выстраивается амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) волны − распределение амплитуд $A(f)$ по диапазону частот.

Сопоставление амплитуд исходной волны $A_0(f)$ и прошедшей волны $A(f)$ на конкретной частоте f позволяет рассчитать коэффициент затухания для этой частотной точки.

Итоговым результатом измерений является частотная зависимость коэффициента затухания $\beta(f)$ в исследуемом диапазоне.

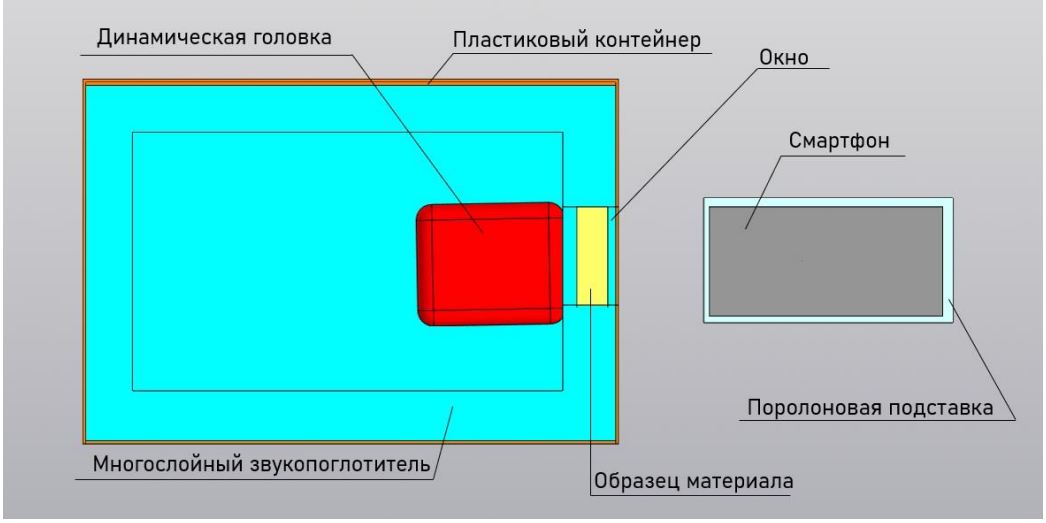

Рисунок 1. – Экспериментальная установка (вид сверху)

В состав установки входят (рис.1):

1. Измерительная камера – пластиковый контейнер, облицованный многослойным звукопоглотителем (синтепон, поролон, войлок, воздушная прослойка, гофрокартон).
2. Источник звука – динамическая головка, расположенная внутри контейнера, напротив вырезанного окна.
3. Окно – проем в одной из стенок контейнера, в который плотно устанавливается исследуемый образец.
4. Приемник сигнала – смартфон с микрофоном, расположенный снаружи контейнера напротив измерительного окна на поролоновой подставке.
5. Пять образцов исследуемых материалов толщиной 2 см – пенопласт, гофрокартон, поролон, синтепон, войлок.

Методика проведения эксперимента состоит из нескольких этапов.

Этап 1. Замер эталонного сигнала (A_0)

1. Образец не установлен в окно контейнера.
2. В приложении Phyphox на смартфоне выбирается режим «Звуковой спектр». В настройках значение дискретизации устанавливается на 4096.
3. Динамическая головка внутри контейнера воспроизводит непрерывный свип-тон длительностью 10 секунд в диапазоне 100–4000 Гц.
4. Приложение записывает АЧХ эталонного сигнала (A_0).
5. Данные замера сразу сохраняются в отдельный файл в формате таблицы Microsoft Excel с уникальным именем.
6. Процедура повторяется всего четыре раза при неизменных настройках громкости динамической головки и постоянном положении смартфона относительно окна.

Этап 2. Замер сигнала с образцами (A)

1. В окно контейнера плотно устанавливается образец первого исследуемого материала.
2. Динамическая головка внутри контейнера воспроизводит непрерывный свип-тон длительностью 10 секунд в диапазоне 100-4000 Гц при тех же настройках громкости.
3. Приложение Phyphox записывает АЧХ прошедшего сигнала $A(f)$.
4. Данные замера сохраняются в отдельный файл в формате таблицы Microsoft Excel с уникальным именем.
5. Для данного материала проводится серия из четырех повторных замеров.
6. Процедура повторяется для остальных четырех материалов при неизменных параметрах.

В приложении Phyphox каждый замер сохраняется как отдельный файл в формате таблицы Microsoft Excel. Так как для каждого сигнала с образцом материала и для эталонного сигнала выполняется по 4 замера. В итоге получается 24 отдельных файла с необработанными спектральными данными. Все первичные записи сводятся в одну рабочую книгу Excel.

Лист эталонного сигнала. В него с первых листов исходных файлов переносятся данные замеров. В отдельном столбце рассчитывается средняя амплитуда эталонного сигнала для каждой частоты.

Листы материалов:

1. Сводятся данные первых листов 4 исходных файлов каждого материала.
2. Рассчитывается средняя амплитуда прошедшего сигнала $A(f)$.
3. Прямо на этом же листе рассчитывается коэффициент затухания $\beta(f)$ с подтягиванием эталонного значения $A_0(f)$ с листа эталонного сигнала.

Для каждого материала строится график $\beta(f)$. С помощью полиномиального тренда 6-й степени строится сглаженная линия для аппроксимации и визуализации результатов. Это позволяет проанализировать частотную зависимость коэффициента затухания $\beta(f)$ каждого образца.

Экспериментальные исследования проводились в закрытом отапливаемом помещении при комнатной температуре (около 20°C) и естественной влажности.

Сводные статистические характеристики рассчитанного коэффициента затухания $\beta(f)$ для исследованных материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты измерений коэффициента затухания материалов

Материал	Среднее значение $\beta_{ср}$, см$^{-1}$	Минимальное ненулевое значение β_{min},	Максимальное значение β_{max}, см$^{-1}$	Характер текстуры

		$см^{-1}$		
Гофрокар-тон	0,192	0,0013	1,324	Жесткая слои-стая
Пенопласт	0,181	0,0007	1,044	Жесткая за-крытопори-стая
Войлок	0,175	0,0018	0,976	Плотная во-локнистая
Поролон	0,168	0,0011	0,858	Мягкая пори-стая
Синтепон	0,167	0,0045	0,895	Объёмно-волокнистая

Поролон имеет множество мелких пор, заполненных воздухом. При прохождении звуковой волны часть звуковой энергии значительно поглощается. Благодаря пористой структуре он хорошо подходит для уменьшения эха в помещениях. В нашем эксперименте наиболее высокие показатели $\beta(f)$ наблюдались на частотах в диапазоне 250-700 Гц и 3000-4000 Гц (рис.2).

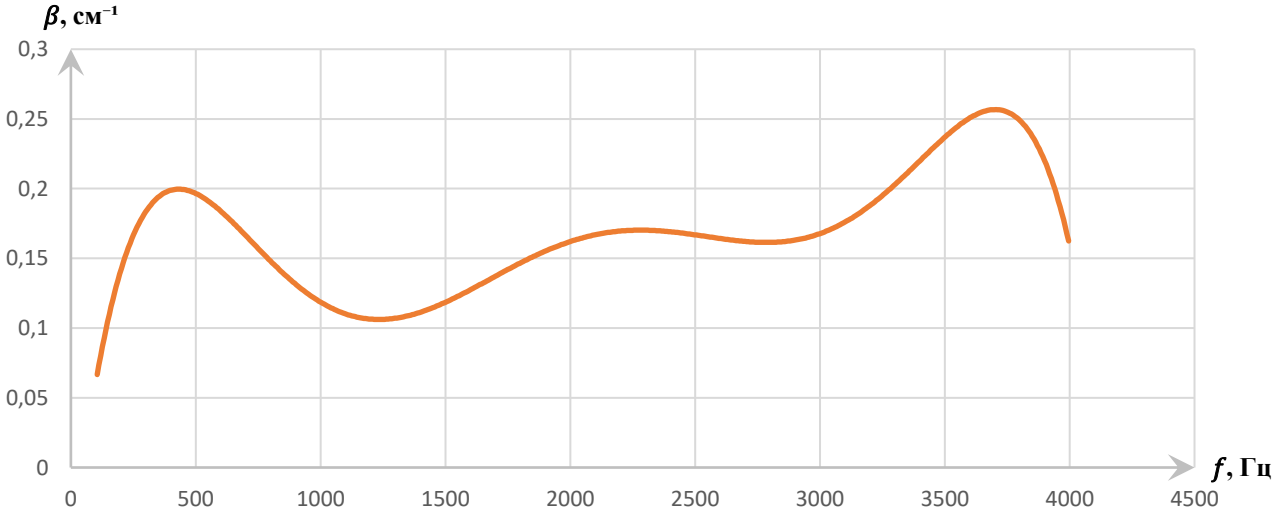

Рисунок 2. Зависимость коэффициента затухания для поролона от частоты

Синтепон состоит из тонких синтетических волокон с воздушными промежутками. При прохождении звука воздух колеблется между волокнами, а часть энергии волны теряется из-за трения и теплообмена. Такая структура способствует поглощению звука, поэтому синтепон может использоваться для уменьшения эха в помещениях. Повышенные значения $\beta(f)$ наблюдались на частотах в диапазоне 200-600 Гц, а также 1500-2750 Гц (рис.3).

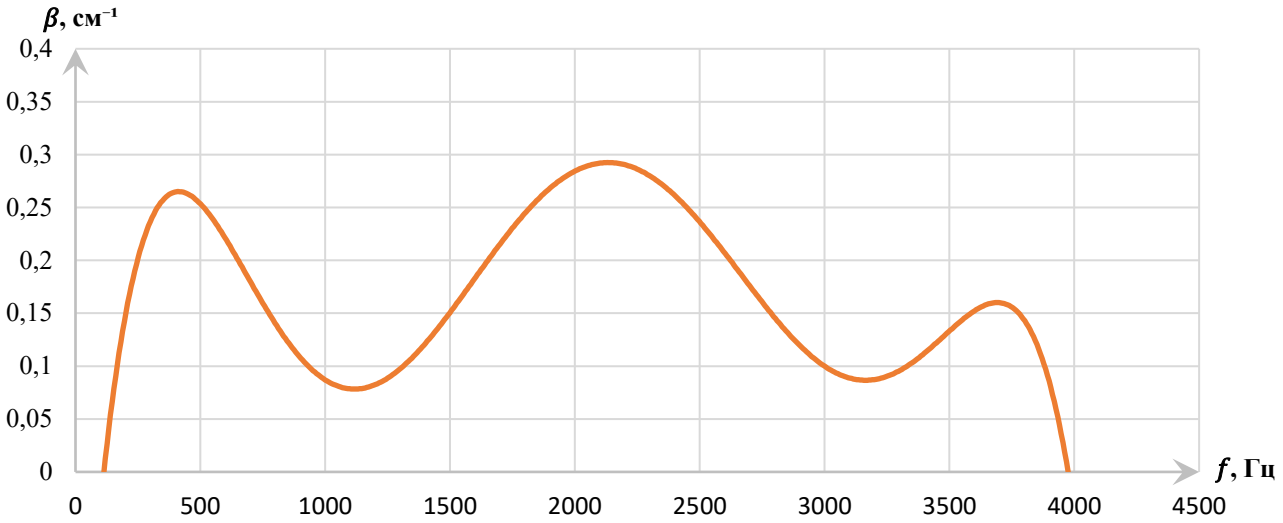

Рисунок 3. Зависимость коэффициента затухания для синтепона от частоты

Войлок состоит из плотно переплетённых волокон. При прохождении звуковой волны воздух движется между волокнами. Однако из-за плотной структуры часть звуковой волны отражается от поверхности. Поэтому войлок не всегда эффективен для уменьшения эха. Заметное возрастание $\beta(f)$ наблюдалось на частотах в диапазоне 250-750 Гц и 1700-3000 Гц (рис.4).

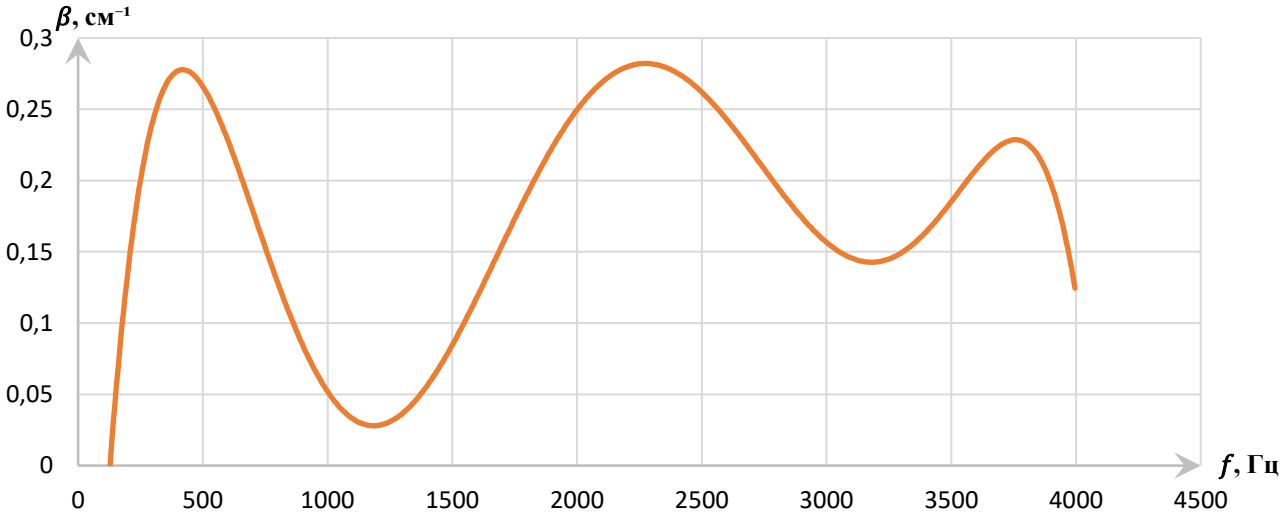

Рисунок 4. – Зависимость коэффициента затухания для войлока от частоты

Пенопласт имеет преимущественно закрытопористую структуру, поэтому значительная часть звуковой энергии отражается от его поверхности, а не поглощается. По этой причине пенопласт обычно плохо подходит для уменьшения эха. Однако в нашем эксперименте повышенные значения $\beta(f)$ наблюдались на частотах в диапазоне 250-700 Гц и 1750-2750 Гц, что может быть связано в том числе с отражением звуковых волн.

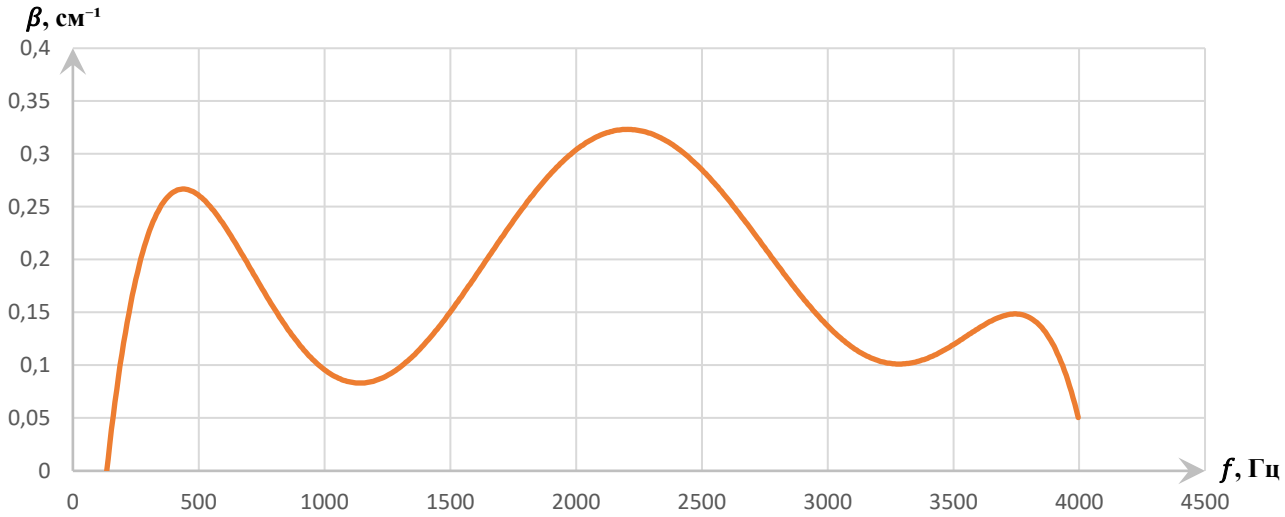

Рисунок 5. - Зависимость коэффициента затухания для пенопласта от частоты

Гофрокартон состоит из нескольких слоёв бумаги с воздушными промежутками. При воздействии звуковой волны часть энергии теряется из-за колебаний бумажных слоёв и трения воздуха. Однако часть звука отражается, поэтому гофрокартон может быть менее эффективен для уменьшения эха, чем пористые и волокнистые материалы. Возрастание $\beta(f)$ наблюдалось на частотах в диапазоне 100-500 Гц, а также 1000-2000 Гц.

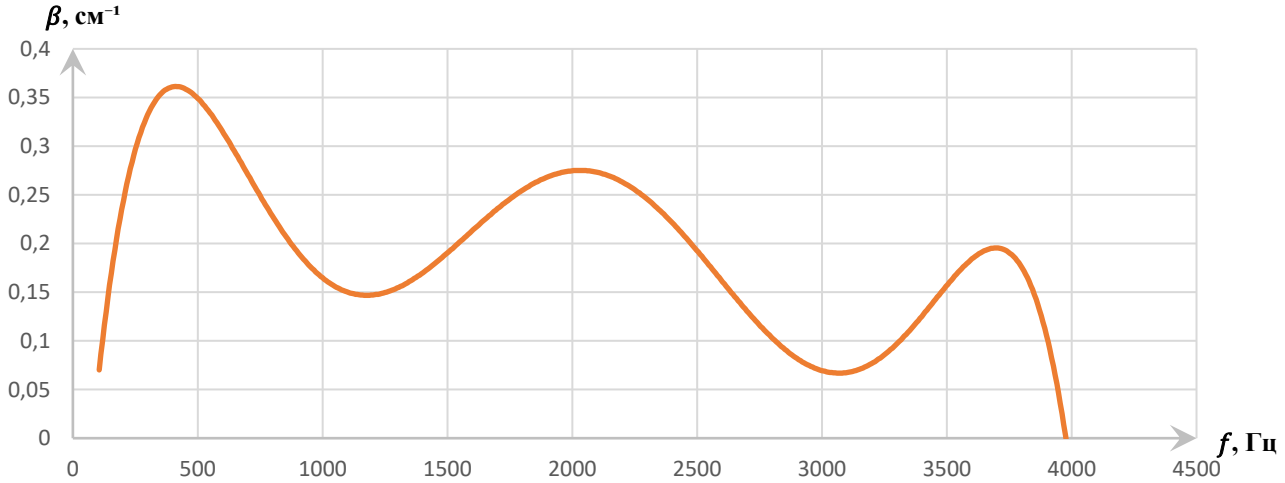

Рисунок 6. – Зависимость коэффициента затухания для гофрокартона от частоты

Нами для исследований была разработана и экспериментально проверена мобильная установка для исследования частотной зависимости коэффициента затухания акустических волн в диапазоне 100-4000 Гц. Исследования проводились на пяти материалах различной структуры широко используемыми в строительстве: поролоне, синтепоне, войлоке, пенопласте и гофрокартоне, построены графики зависимости коэффициента затухания от частоты.

На некоторых частотах амплитуда сигнала после установки образца могла превышать эталонную. Одной из возможных причин этого является интерференция звуковых волн, образовании стоячих волн внутри корпуса вследствие отражения волн от внутренних стенок. При распространении звука внутри измерительной камеры волны отражаются от её стенок и поверхности исследуемого материала. В результате наложения волн могут возникать области усиления и ослабления амплитуды результирующей волны воспринимаемой приемником, а также стоячие волны.

На точность измерений также могла повлиять конструкция измерительной камеры. Несмотря на наличие звукопоглощающей облицовки, отражения от внутренних поверхностей могли сохраняться и изменять распределение звукового давления. Кроме того, микрофон смартфона регистрировал суммарный звуковой сигнал, не позволяя отделить прошедшую через материал волну от отражённых. Поэтому измеряемая амплитуда зависела не только от свойств исследуемого материала, но и от особенностей звукового поля в установке.

При обработке данных отрицательные значения коэффициента затухания условно заменялись нулями. Однако такая замена не устраняет физические причины возникновения отклонений и не повышает достоверность остальных результатов. Следовательно, даже положительные значения коэффициента могли содержать погрешности, связанные с отражением и интерференцией звуковых волн.

Таким образом, полученные результаты выявили существенные ограничения разработанного метода, не позволяющие в текущей реализации рассматривать рассчитанные значения коэффициента затухания как достоверные характеристики исследованных материалов. Для его улучшения необходимо уменьшить влияние отражений, усовершенствовать измерительную камеру и улучшить способ регистрации звукового сигнала.

В итоге поставленная задача экспериментальной проверки метода была выполнена. Хотя возможность точного определения коэффициента затухания не подтвердилась, проведённое исследование позволило выявить основные недостатки разработанной установки и определить направления её дальнейшего совершенствования.

Список литературы

1. Колебания и волны: учеб.-метод. пособие по аудиторным практ. занятиям и самостоятельной работе для студентов всех направлений подготовки / А.С. Климов, А.В. Медовник, Ю.Г. Юшков. – Томск: Гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроника, 2018. – 114 с.

2. Методические указания по выполнению лабораторной работы № 8 Исследование измерительных преобразований в акустических полях // Национальный исследовательский Томский политехнический университет [Электронный ресурс] – URL: https://portal.tpu.ru/SHARED/ l/LEX-K/lessons/PIP/Metod/M_7_Acoustic.PDF?ysclid=mvdyh0kwbi55067 2586

3. Общая акустика. М. А. Исакович. Учебное пособие. Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, Москва, 1973 г. [Электронный ресурс] – URL: https://djvu.online/file/nN4YlOLqRp8RL? ysclid= muk31jb3uc819059983

4. Ультразвук в медицине: учебное пособие / А.В. Халиуллина, Б.И. Хайрутдинов; под ред. А. В. Аганова. – Казань: Издательство Казанского университета, 2022. – 116с.

5. Трофимова, Т. И. Курс физики: учебное пособие для инженерно-технических специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 18-е изд., стер. – Москва: Академия, 2010. – 560 с. – ISBN 978-5-7695-7601-0.