

УДК: 534.62 + 378
OECD: 01.03.AA

Разработка экспериментальной установки для проведения лабораторных исследований шумозащитных материалов

Тюрин А.П.

Д.т.н., профессор кафедры «Техносферная безопасность»,
ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», г. Ижевск, РФ

Аннотация

В статье рассматриваются особенности проектирования лабораторной экспериментальной установки в виде малой реверберационной камеры для выполнения простейших акустических экспериментов в ней на этапе обучения. Выполненный обзор научных источников показал, что данная тема до сих пор является актуальной в связи с поиском возможностей предварительной оценки шумозащитных материалов на предмет их шумозащитных свойств. Изготовленная камера внутренним объемом порядка $0,367 \text{ м}^3$ содержит источник звука для генерации звуковой волны определенной частоты, микрофон, шумоизмерительный прибор, акустическую систему для воспроизведения звукового сигнала. Диапазон рабочих частот камеры – 700–8000 Гц. В качестве возможных вариантов использования является отработка методики реализации факторного эксперимента с использованием одно- или многослойных акустических преград. Построены линейные модели уровня звука в камере в зависимости от количества преград и начального уровня звука в установке при исходных частотах 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц. Все коэффициенты линейных моделей значимы. Использование реверберационных камер малого объема для решения задач по оценке шумозащитных, звукоизоляционных свойств материалов небольшой толщины имеет свои ограничения по частоте, однако позволяет сформировать необходимые знания и навыки на определенном этапе обучения, например, студентов.

Ключевые слова: лабораторная модель, малая реверберационная камера, шумозащитный материал, планирование эксперимента, обучение.

Development of an experimental setup for laboratory research of noise-protective materials

Tyurin A.P.

DSc, professor of the Technospheric Safety department, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Abstract

The article discusses the subject of designing a laboratory experimental setup in the form of a small reverberation chamber for performing the simplest acoustic experiments in it at the training stage. The performed review of scientific sources showed that this topic is still relevant in connection with the search for opportunities for a preliminary assessment of noise-protective materials for their noise-protective properties. The manufactured chamber with an internal volume of about 0.367 m^3 contains a sound source for generating a sound wave of a certain frequency, a microphone, a noise meter, and an acoustic system for reproducing a sound signal. The operating frequency range of the chamber is 700–8000 Hz. Possible use cases include the development of a method for implementing a factorial experiment using single or multilayer acoustic barriers.

Linear models of the sound level in the chamber are constructed depending on the number of obstacles and the initial sound level in the installation at the initial frequencies of 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz. All coefficients of linear models are significant. The use of small-volume reverberation chambers for solving problems of assessing the noise-shielding, sound-insulating properties of materials of small thickness has its own frequency limitations, however, it allows you to form the necessary knowledge and skills at a certain stage of training, for example, students.

Keywords: *laboratory model, small reverberation chamber, noise protection material, experiment planning, training.*

Введение

Основы знаний об акустических свойствах материалов закладываются в процессе обучения. Развитие технологий приводит к появлению новых материалов, обладающих различными шумозащитными свойствами, которые могут быть исследованы на предварительной стадии. Очень хорошо, когда участие в создании лабораторных устройств принимают обучающиеся под руководством опытного наставника. Для выполнения простейших экспериментов, связанных с изучением шумозащитных свойств материалов на практике, может быть использована реверберационная камера малого объема. Использование реверберационных камер для решения таких типов задач имеет свои ограничения по частоте, однако позволяет сформировать необходимые знания и навыки на определенном этапе обучения, например, студентов. В контексте данной статьи речь пойдет о простейшей модели реверберационной камеры.

Целью данного исследования является разработка лабораторного устройства по наглядному изучению шумозащитных свойств материалов. Его реализация позволит повысить уровень практических навыков и теоретических знаний у выпускаемых вузом специалистов в области защиты от шума, а также даст возможность проводить определенные экспериментальные исследования в области шумозащитных свойств инновационных материалов и конструкций. В качестве первого этапа важным является изучение накопленного опыта в области ранее созданных реверберационных камер малого объема, их достоинств и недостатков, в том числе с привлечением методов моделирования акустических процессов.

1. Обзор состояния исследований

В целом, как показывает обзор научных источников [1-7, 12, 14], задача создания малых реверберационных камер активно решается, в том числе, зарубежными учеными. Исследователи указывают, что малые камеры также являются достаточно эффективными и изготавливаются с меньшими затратами. Зачастую исследования с помощью них имеют промежуточный характер, предваряющий исследования в больших реверберационных камерах. Камеры малого объема могут быть использованы при условии обеспечения диффузности поля в них и, соответственно, случайном падении звука на образец. В них можно исследовать как многослойные, так и однослойные конструкции, однако единых методов, позволяющих достичь соответствующий уровень точности и воспроизводимости, пока не разработано.

Тем не менее, данные, собранные в совокупности, отлично доказывают, что оценки в малых объемах могут давать практически одинаковые результаты в измерении поглощающих свойств материалов. Удовлетворительный уровень точности возникает в случае однородного диффузного поля внутри [9]. Как правило, данные подобных

исследований используются для получения дополнительных совокупностей данных для разработки методов контроля звукопоглощения в устройствах малого объема.

В связи с доступностью и простотой изготовления камеры малого объема не изготавливаются одним и тем же производителем, и в связи с этим, отличаются внутренней геометрией, оборудованием для анализа и методами измерений. Противоположная ситуация наблюдается для камер большого объема (более 200 м³), применительно к которым разработанные стандарты приводят к получению согласованных результатов, полученных в разных лабораториях. В случае с камерами малого объема получение достоверных результатов зависит от степени разработки методов измерений, включая инновационные техники обработки принимаемых акустических сигналов.

В источнике [1] использовалась миниатюрная инновационная реверберационная камера для исследования индексов звукоизоляции деревянных панелей (древесных плит) толщиной 2-4 см в 1/3 октавных полосах частот в диапазоне 125-3150 Гц. Малая камера использовалась в сопряжении с безэховой камерой. Ее размеры составляют всего 1,0×1,0×1,0 м с внутренней отделкой древесноволокнистой плитой средней плотности. Результаты интерпретировались с использованием методов статистического анализа.

В камерах большого объема наблюдается большое время реверберации. С учетом стоимости технологическими ограничениями важным становится определить объем малой камеры, которая может быть спроектирована и изготовлена. В источнике [2] малогабаритная камера объемом 3 м³ использовалась для акустических измерений на средних и высоких частотах в диапазоне 1/3 октавных полос 125-8000 кГц. На этапе проектирования ее акустические характеристики моделировались с помощью метода конечных элементов, а время реверберации оценивалось обработкой импульсной характеристики. Как утверждают авторы исследования, малая реверберационная камера показала себя надежным инструментом. С помощью нее авторы определяли как коэффициенты звукопоглощения, так и коэффициенты рассеяния для звукопоглощающих и звукорассеивающих материалов нескольких типов.

Использование малых реверберационных камер находит отражение и для оценки звукопоглощения материалов, например, сложных по структуре сэндвич-панелей, применяемых в каютах кораблей. Как утверждают авторы [3], прогнозирование и оценка звукопоглощения таких конструкций, применяемых в судостроении, затруднена, если прибегать только к теоретической оценке. Дополнительно предлагается использовать экспериментальный подход с использованием малогабаритной реверберационной камеры. В работе авторы оценивали звукоизоляцию сэндвич-панелей различных видов с площадью образцов в 1,2×1,0 м в соответствии со стандартом «ASTM standard method for laboratory measurement of airborne sound transmission loss of building partitions and elements, American Standard ASTM E 90-09». Для целей исследования были изготовлены две камеры объемом 2,31 м³ и 3,25 м³. В качестве проверки точности измерений в ней выполнены измерения также и в большой реверберационной камере. В диапазоне среднегеометрический 1/3 октавных частот 125 – 3150 Гц результаты показали удовлетворительное схождение.

Как упоминалось выше, для более точного измерения различных акустических величин звуковое поле внутри камеры должно обладать высокой степенью диффузности. Для этих целей принято устанавливать вращающиеся, подвесные, тонкие изогнутые диффузеры. Однако, установка таких устройств имеет свои ограничения в объеме камеры, что не всегда способствует достижению требуемого коэффициента диффузности. В работе [4] авторы используют малую реверберационную камеру внешними размерами 1,2×1,5×0,95 м для оценки влияния двух типов диффузеров на создаваемое внутри звуковое поле в соответствии с международными стандартами. Камеры были изготовлены из деревянных панелей толщиной 2,8 см, обработанных двумя слоями лака. Анализ

данных показал, что граничные и подвесные диффузоры производят примерно равную диффузию в звуковом поле.

В исследовании [5] представлены конструкция, устройство и процесс калибровки и автоматизации реверберационной камеры для небольших образцов. Созданное устройство в виде малогабаритной камеры имеет объем $1,12 \text{ м}^3$, что является достаточным для испытаний образцов площадью в $0,3 \text{ м}^2$. Для повышения степени диффузности звукового поля использовались диффузоры, и автоматизация измерений позволила повысить надежность результатов. В целом, в пределах диапазонов частот 400-5000 Гц малая реверберационная камера зарекомендовала себя как хороший инструмент для оценки коэффициентов звукопоглощения материалов. Достигнутые результаты имеют достаточную сходимость с аналогичными результатами, полученными в большой реверберационной камере. Коэффициент детерминации R^2 в сравнительном эксперименте в диапазоне частот 400 – 5000 Гц находится на уровне 0,95-0,98. На частотах 125, 250, 315 Гц – на уровне 0,46 – 0,58.

В работе [6] авторы проектируют малогабаритную установку в виде двух смежных камер для исследования звукоизоляции материалов. Камеры имеют вид в виде двойного пятиугольного параллелепипеда, а объем отдельной камеры таков, что она укладывается в куб с диагональю около 1,2 м. В качестве материала для изготовления использовались мазонитовые панели, фанера, стекловолокно. Сечение проема, в который помещался материал для исследования, составил порядка $0,55 \times 0,50 \text{ м}$, диапазон $1/3$ октавных частот, на которых проводились измерения: 400 – 4000 Гц. Авторы выполняли исследование звукоизоляции нескольких материалов в сравнении друг с другом.

В России также велись работы по созданию малых реверберационных камер, однако упоминание их в научных источниках не получило широкого распространения. Так, в [7] изучаются возможности малой камеры с размерами $0,8 \times 0,5 \times 0,1 \text{ м}$, в которой воспроизводили уровень звука в 143 дБА, а тестовый образец располагался на одной из соответствующих сторон. До некоторого времени действовал ГОСТ 26417-85 «Материалы звукопоглощающие строительные. Метод испытаний в малой реверберационной камере» (в настоящее время отменен). В соответствии с ним ускоренный метод определения коэффициентов звукопоглощения строительных материалов на малых образцах площадью $1-1,5 \text{ м}^2$ и толщиной не более 100 мм основан на использовании малой камеры общим объемом $1,5-2 \text{ м}^3$, где в качестве звукопередающих устройств являются генератор белого шума и громкоговоритель с рабочим диапазоном частот 50–8000 Гц, в совокупности создающих уровни звука до 100 дБА при общем уровне звука вне камеры до 70 дБА. В качестве усовершенствования подобных измерений, было предложено техническое решение, описанное в [8], позволявшее расширить исследования не только в условиях непостоянного, но и импульсного шума со слабой ударной волной. Точность измерений была повышена за счет увеличения звукоизолирующих свойств самой камеры – ее изготовлением с двуслойными стенками, разделенными звукоизолирующим материалом. Источник импульсного шума располагался в одном из верхних углов, противоположном передней стенке с исследуемым материалом.

Недостатки малогабаритных реверберационных камер, как показал анализ, обусловлен достаточно узким, по сравнению с камерами большого объема, частотным диапазоном для исследований. Условия реверберации достигаются либо самим материалом, либо обработкой внутренних поверхностей, например, лаком. Можно отметить, что рабочий диапазон $1/3$ октавных среднегеометрических частот в среднем составляет 400 – 8000 Гц. Хотя исследователи стараются «захватить» и более низкие частоты. Кроме того, использование камеры с жесткими однослойными стенками не обеспечивает приемлемой звукоизоляции ее стенок.

Патентоспособные полезные модели камер относятся к области акустических измерений шумозащитных материалов, которые, в свою очередь, могут быть использованы создания средств коллективной защиты от шума.

2. Особенности распространения звука в малых объемах

Время реверберации в замкнутом объеме зависит от общего поглощения в нем. При условии диффузности поля внутри камеры, методики определения коэффициентов звукопоглощения материалов основаны на обработке импульсных откликов, возникающих внутри объема при или без наличия материала. То есть сначала проводятся исследования в пустой камере, затем – в камере с образцом. Для такого исследования необходимо создать специальные акустические условия с помощью специальной аппаратуры, генерирующей диффузное поле. Понятие «диффузное поле» можно приближенно определить как количество отраженной звуковой энергии, равномерно рассеянной по всему внутреннему пространству помещения. Для повышения степени диффузности используются как подвесные рассеиватели (диффузеры) так и нестандартная, ассиметричная внутренняя форма камеры. Несмотря на выполнение всех требований, тем не менее, сложно достигнуть полностью диффузного поля в малом объеме. В больших реверберационных помещениях по этой причине используют приемы, при которых позиции расположения микрофонов и/или источников тестового сигнала меняются. В дальнейшем при расчетах используются методы усреднения полученных результатов. Точки приема сигнала располагаются, как правило, на расстоянии 1 м от границ помещения, имеющих рассеивателей и образца. Тем не менее, при выполнении даже таких требований, вычисленные коэффициенты звукопоглощения имеют погрешность в особенности на низких частотах в том числе от проявления модальных эффектов внутри объема.

Для определения нижней граничной частоты, f_n , Гц, для реверберационных камер существует несколько простейших зависимостей:

1. По ГОСТ 26417-85:

$$f_n = \frac{170}{b}, \quad (1)$$

где b – средний линейный размер камеры, м.

2. По [10]:

$$f_n \geq 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}}, \quad (2)$$

где T_{60} – время реверберации, с.

3. По [10, 11]:

$$f_n \approx \frac{500}{\sqrt[3]{V}}, \quad (3)$$

где V – объем помещения в м³.

Время реверберации в помещениях оценивается как теоретически, так и практически. В теории в основном используются формулы Сэбина, Эйринга, Миллингтона. Поскольку габаритные размеры и форма реверберационных камер известны заранее и определяются техническими, экономическими и иными возможностями группы исследователей, то наиболее точно время реверберации определяется за счет обработки полученных импульсных откликов в реальном объекте. Для этого существуют хорошо разработанные методы прерывания шума, методы обработки последовательностей конечной длины или методы обработки сигналов полученных с помощью чирпов (линейной частотной модуляции).

Внутренний объем лабораторной установки будет определять диапазон частот, на которых могут выполняться исследования свойств шумозащитных материалов. Звуковые процессы, наблюдаемые во внутреннем ее пространстве, могут рассматриваться с позицией имеющихся теорий распространения звука – геометрической, волновой или статистической.

Применение геометрической (лучевой) теории для моделирования процессов, протекающих в экспериментальной установке, ограничено вследствие малых размеров внутреннего пространства установки. При исследовании низких и средних частот длины волн превышают габаритные размеры установки, а положения геометрической теории справедливы, если размеры отражающих поверхностей много больше длины волны, при этом размеры неровностей поверхностей много меньше длины волны.

Габаритные размеры ограждающих (внутренних) поверхностей установки ориентировочно составляют $0,568 \times 0,568 \times 1,118$ м, при этом объем равен $0,367$ м³. При использовании формулы (3) нижняя граничная частота, начиная с которой можно проводить измерения, составляет 702 Гц. В соответствии с формулой, использованной в [13]:

$$f_n = \frac{c}{\sqrt[3]{\frac{V}{4}}}, \quad (4)$$

где c – скорость звука, м/с, нижняя граничная частота при этом же объеме составит 758 Гц.

Как показал вышеприведенный обзор использования реверберационных камер малого объема, авторы пользуются математическими соотношения на этапе проектирования. Однако рабочие интервалы частот, а также время реверберации определяются в эксперименте. Время реверберации, вычисленное по формуле:

$$t_{60} = \frac{0,161V}{-S \ln(1 - \alpha)}$$

где $\alpha \approx 0,05$, составит 0,361 с. Однако на данном этапе время реверберации в эксперименте не определялось и в работе не учитывалось.

В конструкции для исследования звукоизоляции материалов выполнена центральная перегородка, внутрь которой крепится исследуемый материал (рисунок 1). Источник звука служит причиной возникновения колебаний среды камеры. Устанавливаемая перегородка квадратного сечения, с габаритными размерами высоты и ширины около 0,565 м, благодаря перегородке-раме полностью перекрывает все сечение установки. В результате этого приемник располагается в области геометрической «звуковой тени», то есть все попадающие на него волны проходят через внешние ограждения.

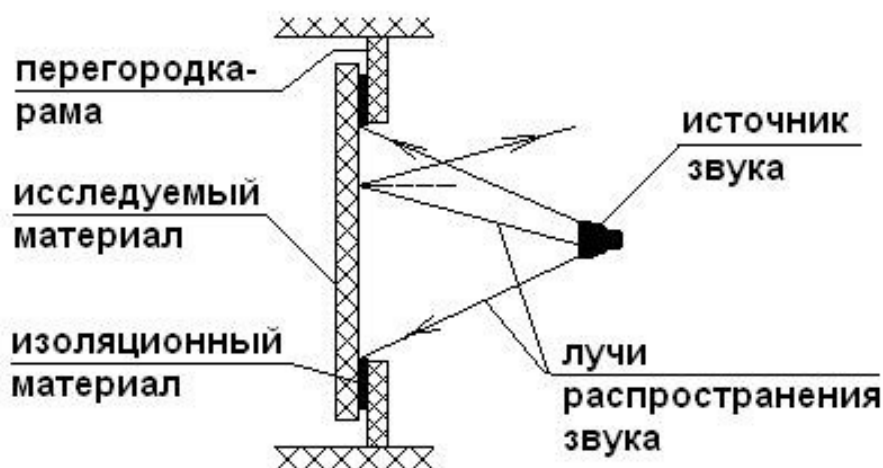


Рис. 1. Схема работы защитной преграды

Зазоры между перегородкой-рамой и стенками установки обработаны силиконовым герметиком, а жесткое крепление исследуемого материала позволяет снизить возникающие в нем вибрации. Зазор между исследуемым материалом и перегородкой-рамой проклеен (со стороны рамы) изоляционным материалом, поэтому зазоры между перегородкой и рамой отсутствуют.

При включении генератора низкочастотных импульсов в сеть (или иного источника, используемого в качестве лабораторного) происходит генерация импульсов частот слышимого диапазона. Импульсы, поступая на динамики аудиосистемы, вызывают их колебания в такт генерируемым частотам. Динамики становятся источниками акустических волн в генераторном отсеке установки.

После включения источника шума происходит процесс возрастания содержащейся в помещении звуковой энергии. В изначальный момент времени звуковые волны распространяются идентично модели открытого пространства. Через некоторый малый промежуток времени волны достигают ограждающих конструкций. Происходит отражение падающих волн, а также их поглощение. Отраженная часть энергии волны возвращается в исходный объем отсека генерации. Поглощенная часть энергии волны вызывает колебательные процессы в изоляционном слое, частично поглощаясь при этом. Неотраженная и непоглощенная часть энергии проходит в соседний объем. Постепенно происходит наложение многократно отраженных волн и заново генерируемых. В результате образуется диффузное звуковое поле.

С течением времени наступает равновесное состояние, когда в помещении поглощается столько же энергии, сколько ее излучает источник, и плотность энергии в помещении стремится к стационарному значению.

Равновесное состояние наступает также в отсеке измерения. На данном этапе необходимо начинать измерение, так как он будет отличаться наименьшими колебаниями. При отключении генератора будет происходить постепенное снижение уровня энергии диффузионного звукового поля за счет рассеивания и поглощения.

Первоначальный пуск установки производится на «холостом» ходу. При этом измеряется уровень диффузного поля, устанавливающийся в экспериментальной установке без применения исследуемого материала. Последующие «рабочие» пуски производится после крепления исследуемого материала. При этом данный материал проявляет как изоляционные свойства, отражая часть акустических волн, ранее свободно проходящих до микрофона, так и поглощающие свойства конструкции.

3. Общая характеристика экспериментальной установки

Общая принципиальная схема устройства экспериментальной установки представлена на рисунке 2. Она представляет собой короб, выполненный из древесностружечных плит толщиной 16 мм, с разделением на два основных отсека: отсек генерации звуковых колебаний и отсек измерения звуковых колебаний. Отсеки делятся перегородкой из исследуемого материала. Ключевые узлы:

1. устройство для генерации исходных звуковых волн различного спектра – стереосистема Creative Inspire P380 (динамик однополосный высоких и средних частот; динамик однополосный низких частот, совмещенный с сабвуфером; встроенный блок усиления сигнала);

2. образец шумозащитного материала (конструкции) – плоская пластина прямоугольного сечения размерами 570×570 мм, толщиной до 25 мм;

3. микрофон измерителя шума с капсулем M101;

4. устройство для генерации сигналов октавных частот – звуковой генератор (генератор сигналов низкочастотный ГЗ-118; спектр генерируемых частот - от 0,1 Гц до 99,9 кГц);

5. устройство для измерения звуковых волн различного спектра после прохождения ими шумозащитного экрана – измеритель шума и вибрации ВШВ-003-М2.

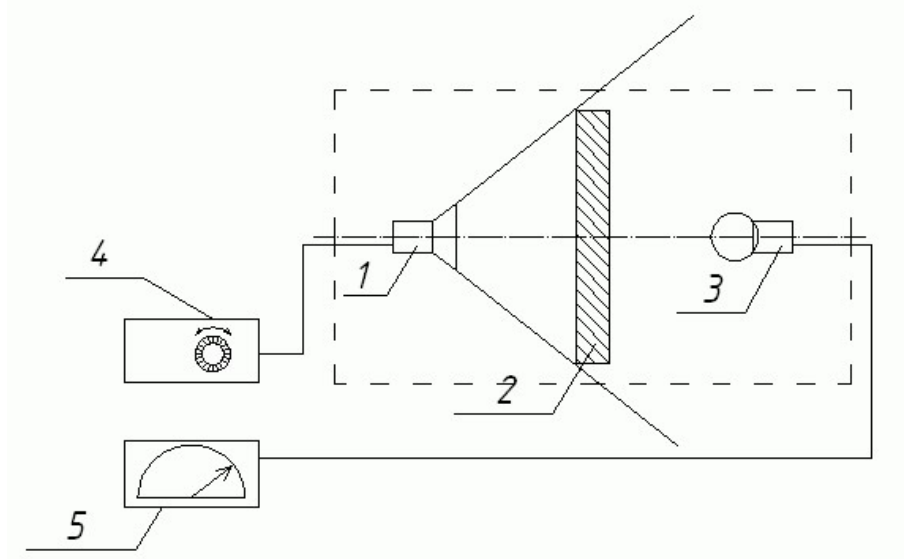


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторной установки

Технические характеристики экспериментальной установки:

- диапазон генерируемых частот шума: от 31,5 до 8000 Гц;
- диапазон уровней звукового давления, создаваемый звуковым генератором: от 30 до 120 дБ;
- диапазон частот измерения звукового давления: от 2 Гц до 18 кГц;
- требования к габаритам исследуемого образца: 565×565 (± 5) мм;
- максимальная толщина слоя исследуемого шумозащитного материала до 25 мм;
- габаритные размеры экспериментальной установки: 1150×600×600 мм.

Общий вид установки представлен на рисунке 3.



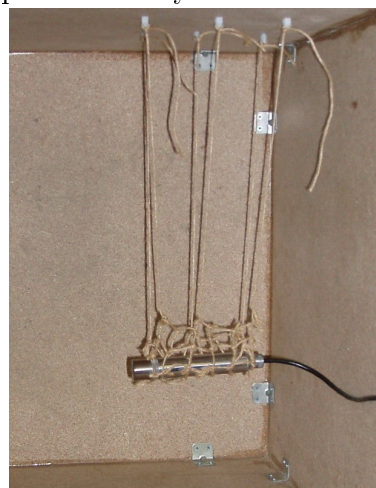
а) Внешний вид установки



б) Крепление акустической системы



в) Вид с преградой из пенопласта



г) Крепление микрофона

Рис. 3. Фотографические изображения установки

Принцип действия экспериментальной установки:

Звуковой генератор (4) при его включении в сеть, является источником сигналов, преобразуемых в звуковые волны динамиками стереосистемы (1), различного диапазона и уровня звукового давления. Корректировка основных параметров генерируемых звуковых волн достигается за счет изменения частоты колебаний на звуковом генераторе (4) и уровня звукового давления – при помощи регулятора громкости стереосистемы (1).

Между приемником звуковых колебаний – капсюлем (3) измерителя шумомера располагается пластина исследуемого материала (2) или конструкция, выполняющая шумозащитную функцию. Пластина надежно крепится к корпусу экспериментальной установки с помощью зажимов (моделирование условий прочного крепежа строительных конструкций). Прочность крепления позволяет избежать вибраций пластины вследствие воздействия на нее звуковых волн, и, соответственно, максимально снизить возможность становления самой пластины источником шума.

Пластина исследуемого материала плотно прилегает к корпусу экспериментальной установки, между рамой установки и исследуемым материалом проложен шумозащитный слой, что снижает проникновение шума через неплотности конструкции (рис. 3). Приемником звуковых колебаний служит капсюль шумомера (3), установленный на противоположной стороне, относительно исследуемого материала, от источника. На шкале прибора, в соответствии с установками отражаются показания, используемые для

дальнейшего анализа.

Исполнение установки может быть различным, различные корпуса, принципы крепления, генерирующие и измеряющие приборы. Степень автоматизации измерений достигается, в том числе, за счет собственного программного обеспечения для обработки звуковых сигналов, подаваемых через источник сигнала и принимаемых микрофоном. В зависимости от точности прибора, используемого для измерения шума, меняется точность измерения всего экспериментального комплекса. Конечно, использованный в данный момент шумомер ВШВ-003М2 является устаревшим прибором, снятым с производства. Однако использование его для учебных целей вполне оправдано. Возможности звукового генератора совместно с измерителем шума определяют широту исследуемых параметров по частоте и силе (уровню звукового давления, энергии звуковых волн и т.д.).

Характеристика и особенности применяемых в данной экспериментальной установке деталей более подробно представлена ниже.

Система генерации звуковых колебаний

В экспериментальной установке были использованы следующая система генерации шумов:

- генератор сигналов низкочастотный ГЗ-118;
- аудиосистема Creative Inspire P380.

Генератор сигналов низкой частоты ГЗ-118 (рисунок 4) способен создавать сигналы частотой от 0,1 Гц до 99,9 кГц, что значительно перекрывает воспринимаемый человеческим ухом диапазон. Настройка генерируемой частоты осуществляется при помощи трех ручек частоты (1 на рисунке 4) и ручки множителя (2), расположенных на передней панели. Корректировка производится при помощи ручки расстройки (4). Мощность сигнала настраивается при помощи ручки 5, динамики подключены к гнезду выхода без усилителя.

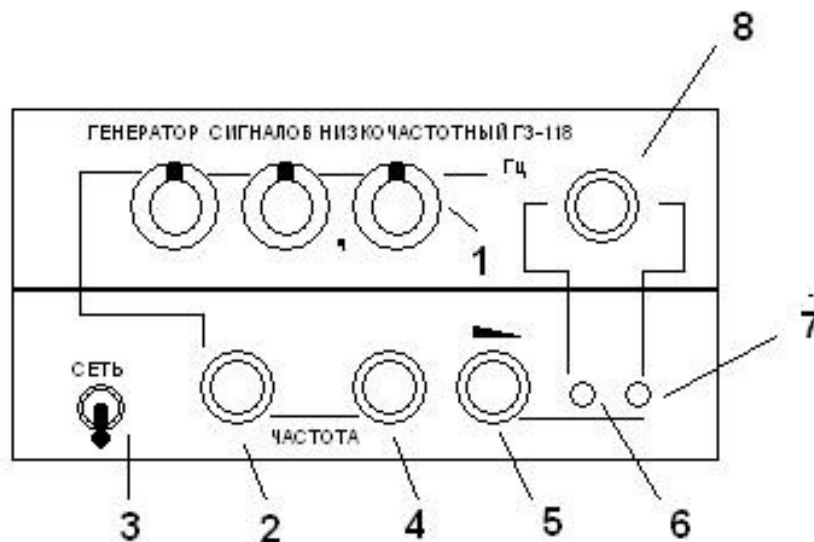


Рис. 4. Вид передней панели генератора сигналов низкочастотного ГЗ-118:

- 1 – ручки настройки частоты (от 0,1 до 99,9);
- 2 – ручка множителя (от 1 до 10^3);
- 3 – тумблер включения в сеть;
- 4 – расстройка частоты;
- 5 – ручка мощности сигнала;
- 6 – выход без усилителя сигнала;
- 7 – выход после усилителя;
- 8 – ручка настройки усилителя (от 0 до 60 дБ)

Аудиосистема настроена на работу в режиме моновоспроизведения (сигнал одинаков на оба динамика и сабвуфер). Сигнал от генератора поступает на усилитель, расположенный в корпусе сабвуфера, и после усиления передается на динамики.

Аудиосистема состоит из динамика однополосного, предназначенного для воспроизведения высоких и средних частот и динамика однополосного, предназначенного для воспроизведения низких частот, совмещенного с сабвуфером и встроенным блоком усиления сигнала.

Регулятор громкости способен регулировать уровень звукового давления. В дополнение имеется ручка настройки уровня использования сабвуфера.

Устройство для измерения шума

Шумомер ВШВ-003-М2 предназначен для измерения уровня звука с частотными характеристиками А, В, С; уровня звукового давления в диапазоне частот от 2 Гц до 18 кГц и октавных полосах в диапазоне частот от 2 Гц до 8 кГц в свободном и диффузионном полях; средних квадратических значений виброускорения и виброскорости.

Съем информации о шуме осуществляется капсулем микрофонным конденсаторным М101. ВШВ-003-М2 относится к шумомерам I класса точности.

Функционально ВШВ-003-М2 состоит из:

- 1) капсуля М101;
- 2) предусилителя ВПМ-101;
- 3) усилителя;
- 4) фильтра октавного;
- 5) устройства индикации;
- 6) преобразователя напряжения;
- 7) источника питания или батарей.

Корпус экспериментальной установки

Корпус экспериментальной установки представляет собой короб, сделанный из древесностружечных плит толщиной 16 мм. Крепление древесностружечных плит между собой осуществляется при помощи мебельных уголков (с ребрами жесткости для усиления конструкции), скрепленных шурупами. Короб установки разделен на две части: отсек генерации звуковых колебаний и отсек измерения звуковых колебаний. Отсеки делятся перегородкой из исследуемого материала. Крепление перегородки (рамы из древесностружечной плиты) также осуществляется при помощи мебельных уголков со стороны отсека измерения.

Стыки плит (перед их скреплением) проложены пористым изоляционным материалом, обладающим хорошими тепло- и звукоизоляционными свойствами. Внешние стыки плит, стыки плит между отсеками, а также изолирующая окантовка дверцы, обработаны силиконовым герметиком для обеспечения лучшей звукоизоляции. Дополнительная изоляция стыков является необходимым условием повышения шумоизоляционных свойств установки, так как щели, отверстия, а также неплотности конструкции являются хорошими проводниками звука. Согласно существующему опыту в строительстве для устранения щелей и отверстий рекомендуется использовать акриловые или силиконовые герметики, тем более что последние обладают хорошей эластичностью – важной особенностью материала для заделки различных трещин.

Разделение на отсеки производится при помощи перегородки-рамы, к которой осуществляется крепление исследуемого образца. На поверхность рамы, со стороны крепления исследуемого материала, приклеен изоляционный материал, самоуплотняющийся под давлением. При недостаточной твердости исследуемого материала крепление

осуществляется через раму из древесноволокнистой плиты.

В месте прилегания дверцы (на лицевой стороне установки) по краям древесностружечных плит, по всему периметру дверного проема, сделана окантовка из деревянных реек. Со стороны дверного проема установки на рейки, а также торец перегородки-рамы, также приклеен изоляционный материал, самоуплотняющийся при закрывании дверцы.

Створка двери установки выполнена из древесностружечных плит с вырезами под окна для каждого из двух отсеков. Изоляция оконных проемов выполнена при помощи двустороннего крепления органического стекла на шурупах. Между стеклом и древесностружечной плитой проложен слой изолирующего материала, стыки обработаны силиконовым герметиком. Створка двери подвешена на петлях к нижней плите установки.

Выводы от измерителя шума и вибрации, а также стереосистемы, проложены по низу торца установки и заизолированы при помощи изоляционного материала и герметика. Крепление проводов, как внутри, так и снаружи, осуществляется при помощи U-образных петель.

Крепление микрофона в отсеке измерения, а также стереосистемы в отсеке генерации, осуществляется при помощи подвешивания на капроновых шнурах к верхней плите установки. Крепление шнуров к верхней плите осуществляется при помощи U-образных петель.

Требования к измеряемому материалу

Конструкция установки позволяет проводить исследование различных плоских материалов с длиной образца 560-570 мм, аналогичной шириной и толщиной до 25 мм.

При недостаточной твердости исследуемого материала возможно его крепление через прокладку из древесноволокнистой плиты или фанеры. Подобная конструкция позволяет исследовать образцы различной толщины, а также образцы, представляющие собой комплексные (многослойные) конструкции. В качестве тестовых образцов могут быть использованы классы пенопластов или аналогичные им пробковые панели, пенополиуретан; органическое стекло, изолон, фанера (*трехслойная*), изовер (*Isover*) – минеральная вата на основе стекловолокна. Звукоизоляционные свойства данных материалов хорошо известны, поэтому результаты, полученные в опыте, могут служить основанием для проверки корректности измерений.

4. Методика исследований на лабораторной установке

Принцип построения эксперимента по исследованию шумозащитных свойств материала и последовательность этапов работы следующие:

1. *Настройка параметров генерируемых акустических волн.* Производится при помощи органов настройки звукового генератора (настройка частоты, изначального уровня звука) и органов настройки системы (регулятора громкости и регулятора использования сабвуфера – для проведения опытов на низких частотах) до включения генератора.

2. *Измерение параметров звуковых волн «в холостую»* (без использования преграды из исследуемого материала или защитной конструкции). В ходе «холостого» пуска определяется работоспособность системы, а также производится окончательная настройка уровня звукового давления и снимаются показания шумомера. Измерение проводится при закрытой установке.

3. *Установка исследуемого материала или конструкции.* Исследуемый материал, надежно и плотно закрепляется к корпусу установки (допускается отступление от данного пункта для пористых и неплотных волокнистых материалов, таких как пенопласт, Изовер

и т.д.). После установки материала крышка установки плотно закрывается.

4. «Рабочее» измерение параметров звуковых волн. В ходе рабочего замера производится снятие показаний шумомера. Измерение проводится при закрытой установке. Для качественного измерения, особенно на высоких частотах, необходимо подождать некоторое время, необходимое для стабилизации диффузного поля.

Анализ полученных результатов. Производится на основании данных, полученных для «холостого» и «рабочего» пуска. Анализ проводится с учетом типа и свойств исследуемого материала, толщины защитного слоя, характеристик исходного генерируемого шума, а также требований соответствующей методики. Обязательным является выявление факторов, которые могут влиять на результат измерения, но не учитываются при проведении эксперимента, а также оценка возможного влияния данных факторов на основе априорной информации.

5. Экспериментальная часть и обработка результатов

Одним из вариантов выполнения исследований в такой лабораторной камере, кроме оценки звукоизоляции материалов, является реализации методологии планирования и постановки факторного эксперимента [15, 16, 17]. Для проведения факторного эксперимента был предложен метод *Бокса-Уилсона* (метод крутого восхождения), позволяющий получать статистические математические модели процессов [16]. Подробно использование данного метода описано и в вышеуказанных источниках. *Планирование эксперимента* – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью [16].

В данной работе был использован предложенный метод для построения интерполяционной формулы для функции снижения звукового давления преградами из органического стекла.

При помощи созданной лабораторной камеры была проведена серия факторных экспериментов вида 2^2 для органического стекла с целью получения линейной математической модели на некотором промежутке значений уровней звука.

В качестве переменных факторов были приняты начальный уровень звука L_0 , устанавливающийся при отсутствии преграды, количество слоев органического стекла n . В качестве исследуемого параметра (функции отклика) была принята разность уровней звука ΔL , вычисляемая по формуле:

$$\Delta L = L_0 - L_{\text{ПР}}, \quad (5)$$

где $L_{\text{ПР}}$ – уровень звукового давления, установившийся при наличии преграды.

Кодированные значения факторов, применяемые в экспериментах, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Кодирование факторов эксперимента и их уровни

Параметр	Обозначение	Уровни		
		-	0	+
Начальный уровень звука, L_0 , дБА	X_1	80	90	100
Количество преград из оргстекла, n , шт	X_2	1	2	3

Планирование всех опытов осуществлялось по матрице, представленной в таблице 2. Вычисление ΔL проводилось по формуле (5). Опыты проводились в

случайном порядке, тем самым снижая вероятность получения систематических ошибок. Для простоты анализа все эксперименты приведены в последовательности, представленной в таблице 2.

Таблица 2

Планирование экспериментов 2^2 (матрица экспериментов)

№ опыта	x_0	x_1	x_2	$x_1 \cdot x_2$	y , снижение уровня звука, дБА
1	+	+	-	-	y_1
2	+	-	-	+	y_2
3	+	+	+	+	y_3
4	+	-	+	-	y_4

Все эксперименты проводились при равномерном дублировании опытов, для каждого значения y_i проводились три параллельных опыта.

Для частот, начиная от 500 Гц до 8000 Гц получены адекватные уравнения регрессии с коэффициентами, являющихся значимыми.

Анализ результатов экспериментов для органического стекла

Частота 500 Гц

Для 500 Гц исследование проводилось в качестве постановочного, для пояснения методики. Несмотря на значимость коэффициентов регрессии, полученных в эксперименте ниже, тем не менее, логично начинать исследования ориентировочно с 700 Гц, поскольку формулы определения нижней граничной частоты (3, 4) основаны на положениях акустики.

Представим зависимость снижения уровня звука y , дБА, в виде уравнения регрессии с учетом возможного взаимодействия факторов:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2, \quad (6)$$

где b_0, b_1, b_2, b_{12} – коэффициенты регрессии.

По полученным данным параллельных опытов вычислим среднее арифметическое значение (таблица 3):

Таблица 3

Среднее арифметическое параллельных опытов для частоты 500 Гц

№ опыта	x_1	x_2	y_1	y_2	y_3	\bar{y}_j
1	+	-	10	10,5	9	9,8
2	-	-	24,5	26	24,5	25,0
3	+	+	22,5	21,5	21,5	21,8
4	-	+	33,5	32	33,5	33,0

Вычислим дисперсию s_j^2 опыта для каждой строки матрицы по данным n параллельных опытов по формуле:

$$s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{uj} - \bar{y}_j)^2, \quad (7)$$

где s_j^2 – дисперсия опыта.

Гипотеза однородности дисперсий проверялась с помощью критерия Кохрена. Гипотеза однородности подтвердилась. Далее, по результатам опытов вычислялись линейные коэффициенты модели, которые соответственно составили: $b_0 = 22,40$; $b_1 = -6,60$; $b_2 = 5,00$; $b_{12} = 1,00$. Все коэффициенты модели по методу сравнения с доверительным интервалом являются значимыми.

Дальнейшие вычисления опускаются в связи с известностью методики обработки результатов эксперимента [17].

Уравнение регрессии, с учетом ранее приведенных вычислений, будет иметь вид:

$$y = 22,40 - 6,60x_1 + 5,00x_2 + 1,00x_1x_2, \quad (8)$$

По F критерию Фишера адекватность найденной модели подтверждается.

Подставим абсолютные параметры (согласно таблице 1) в уравнение регрессии (8):

$$\begin{aligned} y &= 22,40 - 6,60 \left(\frac{L_0 - 90}{10} \right) + 5,00(n - 2) + 1,00 \left[\left(\frac{L_0 - 90}{10} \right) \cdot (n - 2) \right] = \\ &= 89,80 - 0,86L_0 - 4,00n - 0,1L_0n. \end{aligned}$$

В результате анализа данных, полученных во время полного факторного эксперимента 2^2 для частоты 500 Гц в интервале от 80 до 100 дБ начального уровня звукового давления L_0 , была получена следующая линейная модель снижения уровня звукового давления n преградами из оргстекла толщиной 5 мм:

$$\Delta L_{500}^{80-100} = 89,80 - 0,86L_0 - 4,00n - 0,1L_0n. \quad (9)$$

На рисунке 5а выполнено графическое представление линейной зависимости (9).

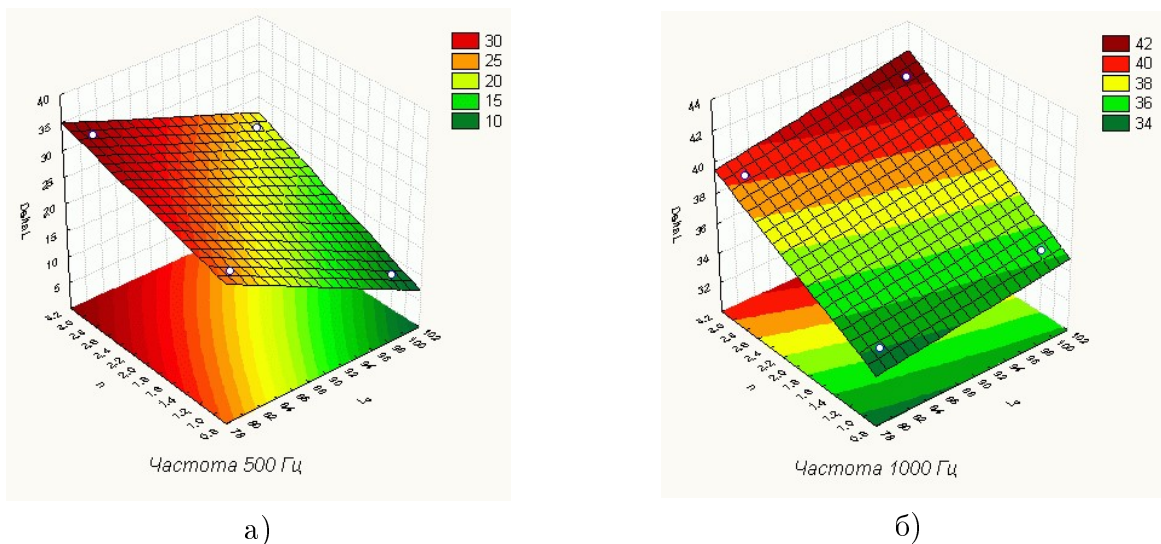


Рис. 5. График линейной функции для частот 500 и 1000 Гц соответственно

Аналогичные опыты были проведены и для частот 1000, 2000, 4000, 8000 Гц. Общий вид полученных формул следующий:

$$\Delta L_{500}^{80-100} = 89,80 - 0,86L_0 - 4,00n - 0,1L_0n;$$

$$\Delta L_{1000}^{80-100} = 24,20 - 0,09L_0 + 2,80n;$$

$$\Delta L_{2000}^{80-100} = 22,50 - 0,16L_0 + 5,25n;$$

$$\Delta L_{4000}^{80-100} = 10,20 - 0,16L_0 + 4,60n;$$

$$\Delta L_{8000}^{80-100} = -9,35 + 0,20L_0 + 1,30n.$$

Интерпретация результатов экспериментов

Анализируя полученные математические модели можно сделать следующие выводы:

- снижение уровня звукового давления в камере при установке преграды зависит от количества преград и начального уровня звукового давления;
- на низких частотах снижение уровня звукового давления, как правило, зависит от взаимодействия данных факторов, что может быть следствием возникновения взаимных вибраций нескольких преград;
- наибольшей эффективностью на средних частотах обладает первая преграда, дальнейшая установка дополнительных слоев дает лишь небольшой прирост защитных свойств;
- наиболее ощутимо влияние дополнительно установленных преград на низких и высоких частотах, где тонкая одиночная преграда является малоэффективной;
- при установке одной тонкой преграды возможно увеличение уровня звукового давления на низких частотах, связанное, вероятно, с колебательными движениями преграды.

В зависимости от видов реализации методик измерения в лабораторной камере, интерпретация результатов будет отличаться в случаях, например, оценки коэффициентов звукопоглощения или рассеяния.

Заключение

Для организации защиты от шума необходимо знать шумозащитные свойства различных материалов и конструкций, исследование которых можно проводить экспериментальным и (или) теоретическим путем.

Выполненное исследование, включая этап изготовления экспериментальной установки – аналога малой реверберационной камеры, позволяет отработать процедуру выполнения экспериментов по исследованию шумозащитных свойств материалов. Говоря о шумозащитных свойствах, имеются в виду различные характеристики – коэффициент звукопоглощения, рассеяния, коэффициент звукоизоляции и пр. Физические их принципы известны, равно как и особенности измерений, однако применительно к данной установке возникнут ограничения по частоте, размерам материала. Должен быть найден баланс между размером образца исследуемого материала и объемом установки. Другой стороной использования данной установки является отработка алгоритма оценки импульсных откликов камеры с использованием различного рода сигналов.

Выполнены исследования снижения уровня звука в камере при наличии преграды, выполненной из одного до трех слоев органического стекла. По экспериментальным данным возможно создание адекватной линейной математической модели процесса на небольшом интервале значений варьируемых факторов.

Разработанная модель малогабаритной камеры имеет большое значение на этапе подготовки специалистов при изучении акустических характеристик материалов и методов их исследований. В случае автоматизации измерений, калибровки, значимость для получения предварительных результатов, образовательных целей трудно переоценить. *Возможные области применения работы:* проведение лабораторных практикумов студентов; изучение шумозащитных свойств материалов и конструкций опытным путем.

Список литературы

1. Purwanto, B., Aryantie, M. H., Zulfachmi, Z., & Aprishanty, R. (2020). Low-Cost and Portable Sound Reduction Box: Innovation for Acoustic Material Performance Measurement. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 52(5), 732. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2020.52.5.9>
2. Hernandez, D., Liu, E. J., Huang, J. H., & Liu, Y. C. (2014). Design and Construction of a Small Reverberation Chamber Applied to Absorption and Scattering Acoustic Measurements. *Advanced Materials Research*, 1077, 197–202. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1077.197>
3. Kim, H.-M. (2010). Using a small-scale reverberation chamber to improve a ship's double sandwich panel noise attenuation performance. *Noise Control Engineering Journal*, 58(6). <https://doi.org/10.3397/1.3495739>
4. Bradley, D. T., Müller-Trapet, M., Adelgren, J., & Vorländer, M. (2014). Effect of boundary diffusers in a reverberation chamber: Standardized diffuse field quantifiers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(4), 1898–1906. <https://doi.org/10.1121/1.4866291>
5. Del Rey, R., Alba, J., Bertó, L., & Gregori, A. (2017). Small-sized reverberation chamber for the measurement of sound absorption. *Materiales de Construcción*, 67(328), 139. <https://doi.org/10.3989/mc.2017.07316>
6. Tsui, C. Y., Voorhees, C. R., & Yang, J. C. S. (1976). The design of small reverberation chambers for transmission loss measurement. *Applied Acoustics*, 9(3), 165–175. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(76\)90015-3](https://doi.org/10.1016/0003-682X(76)90015-3)
7. Велижанина, К.А. Метод малой камеры в применении к исследованию звукопоглощающих систем при высоких уровнях звука / К.А. Велижанина, В.В. Ястребов // *Акустический журнал*, Вып. 24, № 1, 1978. – С. 130–132.
8. Патент на полезную модель «Камера реверберационная» [Текст] / А.П. Тюрин, Б.В. Севастьянов, С.Г. Шуклин. – Опубл. 27.09.2008, Бюл. № 27.
9. Veen, J. Feasibility of a standardized test procedure for random incidence sound absorption tests using a small size reverberation room / J. Veen, P.Saha. – SAE Technical Paper 2003-01-1572.
10. Kuttruff, H. *Room acoustic*. – Elsevier Science Publishers, 2000. – 369 pp.
11. Schroeder, M.R. On frequency response curves in rooms. Comparison of experimental, theoretical, and Monte Carlo results for the average frequency spacing between maxima / M.R. Schroeder, H. Kuttruff // *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 34, № 1, 1962. – P. 76-80.
12. Cox, T.J. *Acoustic absorbers and diffusers; theory, design and application* / T.J. Cox, P. D'Antonio. – New York : Taylor and Francis, 2009. – 477 p.
13. Viscardi, M., & Arena, M. (2019). Sound proofing and thermal properties of an innovative viscoelastic treatment for the turboprop aircraft fuselage. *CEAS Aeronautical Journal*, 10(2), 443–452. <https://doi.org/10.1007/s13272-018-0326-z>
14. Jackson, P., "Design and Construction of a Small Reverberation Chamber," SAE Technical Paper 2003-01-1679, 2003, <https://doi.org/10.4271/2003-01-1679>.
15. Логические основания планирования эксперимента. Налимов В.В. Голикова Т.И. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Металлургия, 1980. – 152 с., ил.
16. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. М.: Наука, 1971. – 283 с., ил.
17. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. – 184 с., ил.

References

1. Purwanto, B., Aryantie, M. H., Zulfachmi, Z., & Aprishanty, R. (2020). Low-Cost and Portable Sound Reduction Box: Innovation for Acoustic Material Performance Measurement. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 52(5), 732. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2020.52.5.9>
2. Hernandez, D., Liu, E. J., Huang, J. H., & Liu, Y. C. (2014). Design and Construction of a Small Reverberation Chamber Applied to Absorption and Scattering Acoustic Measurements. *Advanced Materials Research*, 1077, 197–202. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1077.197>
3. Kim, H.-M. (2010). Using a small-scale reverberation chamber to improve a ship's double sandwich panel noise attenuation performance. *Noise Control Engineering Journal*, 58(6). <https://doi.org/10.3397/1.3495739>
4. Bradley, D. T., Müller-Trapet, M., Adelgren, J., & Vorländer, M. (2014). Effect of boundary diffusers in a reverberation chamber: Standardized diffuse field quantifiers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(4), 1898–1906. <https://doi.org/10.1121/1.4866291>
5. Del Rey, R., Alba, J., Bertó, L., & Gregori, A. (2017). Small-sized reverberation chamber for the measurement of sound absorption. *Materiales de Construcción*, 67(328), 139. <https://doi.org/10.3989/mc.2017.07316>
6. Tsui, C. Y., Voorhees, C. R., & Yang, J. C. S. (1976). The design of small reverberation chambers for transmission loss measurement. *Applied Acoustics*, 9(3), 165–175. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(76\)90015-3](https://doi.org/10.1016/0003-682X(76)90015-3)
7. Velizhanina, K.A. Small chamber method as applied to the study of sound-absorbing systems at high sound levels / K.A. Velizhanina, V.V. Yastrebov // *Ajusticheskij Zhurnal*, vol. 24, issue 1, 1978. – pp. 130–132.
8. Patent RU 76743, U1 «Reverberation chamber» / Tyurin A.P., Sevastianov B.V., Shuklin S.G. – Publication: 27.09.2008, bull. 27.
9. Veen, J. Feasibility of a standardized test procedure for random incidence sound absorption tests using a small size reverberation room / J. Veen, P.Saha. – SAE Technical Paper 2003-01-1572.
10. Kuttruff, H. *Room acoustic*. – Elsevier Science Publishers, 2000. – 369 pp.
11. Schroeder, M.R. On frequency response curves in rooms. Comparison of experimental, theoretical, and Monte Carlo results for the average frequency spacing between maxima / M.R. Schroeder, H. Kuttruff // *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 34, № 1, 1962. – pp. 76–80.
12. Cox, T.J. *Acoustic absorbers and diffusers; theory, design and application* / T.J. Cox, P. D'Antonio. – New York : Taylor and Francis, 2009. – 477 p.
13. Viscardi, M., & Arena, M. (2019). Sound proofing and thermal properties of an innovative viscoelastic treatment for the turboprop aircraft fuselage. *CEAS Aeronautical Journal*, 10(2), 443–452. <https://doi.org/10.1007/s13272-018-0326-z>
14. Jackson, P., «Design and Construction of a Small Reverberation Chamber», SAE Technical Paper 2003-01-1679, 2003, <https://doi.org/10.4271/2003-01-1679>.
15. Nalimov, V.V., Golikova, T.I. *Logical foundations for planning an experiment*. M.: Metallurgiya, 1980. – 152 p.
16. Adler, Yu. P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. *Planning an experiment to find optimal conditions*. Moscow: Nauka, 1971. – 283 p.
17. Spiridonov, A.A. *Planning an experiment in the study of technological processes*. M.: Mashinostroenie, 1981. – 184 p.