

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

А.А. ИГОЛКИН, А.И. САФИН

**ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МР
(МЕТАЛЛОРЕЗИНЫ)**

САМАРА 2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

А.А. ИГОЛКИН, А.И. САФИН

**ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИ
МЕТАЛЛОРЕЗИНЫ (МР)**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний*

САМАРА

Издательство Самарского университета

2016

УДК СГАУ 681.8

Составитель А.А. Иголкин, А.И. Сафин

Рецензент: д.т.н., профессор, заведующий кафедрой химической технологии и промышленной экологии Самарского государственного технического университета Васильев А.В.

Исследование акустических характеристик МР (металлорезины):
метод. указания / сост. *А.Н. Иголкин, А.И. Сафин.* – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2016. – 54 с.: ил.

Рассмотрены теоретические основы расчета и измерения акустических характеристик материала МР. Дано описание оборудования National Instruments (NI) необходимого для проведения экспериментальных исследований. Изложены методы измерения акустических характеристик звукопоглощающих материалов. Подробно описана методика составления программы в LabVIEW для измерения акустических характеристик звукопоглощающих материалов.

Методические рекомендации предназначены для магистрантов.

Табл.3. Ил. 38. Библиогр. 25 назв.

Термины, обозначения и определения	6
Введение	7
1. Теоретические основы лабораторной работы	8
1.1 Классификация пористых материалов	8
1.2 Программа для измерения акустических характеристик на импедансной трубе	14
2 Моделирование акустических характеристик упругопористого материала МР	17
2.1 Математическая модель сопротивления продуванию упругопористого материала МР	17
2.2 Математическая модель акустических характеристик упругопористого материала МР	23
3. Экспериментальные исследования акустических характеристик упругопористого материала МР	30
3.1. Оборудование и программное обеспечение	30
3.2 Порядок создания программы для измерения коэффициента звукопоглощения	32
3.3 Порядок проведения измерений	44
3.4 Определение неопределенности	46
3.5 Сравнение экспериментальных и расчётных данных.	47
3.6 Оформление результатов измерений и отчета	49
Контрольные вопросы	50
Список использованных источников	51

ТЕРМИНЫ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Термин	Обозначение	Определение
1. Звуковое давление	$P_1(f), P_2(f)$	Переменное избыточное давление, возникающее в упругой среде при прохождении через неё звуковой волны
3. Волновое число	k	Волновое число численно равно числу периодов волны, укладываемых в отрезок 2π метров
4. Скорость звука в среде	c_0	Скорость распространения упругих волн в среде
5. Расстояние до материала	l_1, l_2	Расстояние от первого и второго микрофона до тестируемого материала
6. Передаточная функция	$H_{12}(f)$	Представляет собой дифференциальный оператор, выражающий связь между двумя микрофонами
7. Коэффициент отражения	$R(f)$	Коэффициент отражения, представляющими собой отношения амплитуд отражённых волн к амплитуде падающей
8. Коэффициент поглощения	$\alpha(f)$	Коэффициент поглощения энергии звуковых колебаний по определяется как доля энергии звуковых колебаний, поглощённая материалом
9. Акустический импеданс	$Z(f)$	Комплексное сопротивление, которое представляет собой отношение комплексной амплитуды звукового давления к амплитуде объемной колебательной скорости
10. Расстояние между микрофонами	s	-

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время акустический комфорт все больше затрагивает каждого инженера, конструктора и производителей, вследствие чего необходимо изучение свойств материалов. Существует три стандартных метода измерения коэффициента звукопоглощения пористых материалов:

- в интерферометре (трубе Кундта);
- в импедансной трубе;
- в реверберационной камере.

Преимуществами измерения в импедансной трубе являются компактность установки (по сравнению с реверберационной камерой) и возможность автоматизации измерений (по сравнению с трубой Кундта). Поэтому было разработано программное обеспечение для импедансной трубы и исследован коэффициент звукопоглощения вспененного каучука различными типами микрофонов.

С использованием импедансной трубы можно получить акустические свойства материалов без необходимости капитальных вложений, дорогостоящих ресурсов, ни больших помещений.

В настоящем методическом указании изложен метод определения акустических характеристик в импедансной трубе, представлена математическая модель для расчета акустических характеристик упругопористого материала МР и методика оценка неопределенности измерений.

1. Теоретические основы лабораторной работы

Одной из важных задач при создании различных изделий машиностроения является обеспечение норм по уровню шума. Уровень шума строго регламентирован нормативными документами. Требования к шуму изделий машиностроения постоянно ужесточаются. При этом основным источником шума изделий машиностроения является энергетическая установка. В связи с этим самым эффективным способом борьбы с шумом различных изделий машиностроения является снижение шума энергетических установок.

На сегодняшний день существует два основных, применяемых в практике, способа борьбы с шумом энергетических установок. Первым способом является снижение шума непосредственно в источнике. Но это, как правило, приводит к ухудшению других характеристик энергетических установок, таких как КПД, ресурс, расход топлива и т.д. Второй способ – это снижение шума на путях его распространения путем использования звукопоглощающих конструкций (ЗПК).

Для снижения шума используются резонансные ЗПК. Их недостатком является то, что они эффективны в достаточно узком частотном диапазоне. Такого недостатка лишены ЗПК, в которых в роли основного звукопоглощающего элемента выступают пористые материалы.

1.1 Классификация пористых материалов

В общем случае, любой пористый материал обладает матрицей – твердой основой, и свободным пространством – поровым пространством, то есть представляет собой композицию двух сплошных сред в замкнутом объеме: твердой - матрица и жидкой (газовой) – поровое пространство. С точки зрения формирования пористых материалов для спеченных и вспененных поглотителей возможны три обобщенных случая структуры пористого материала (рисунок 1.1) [6].

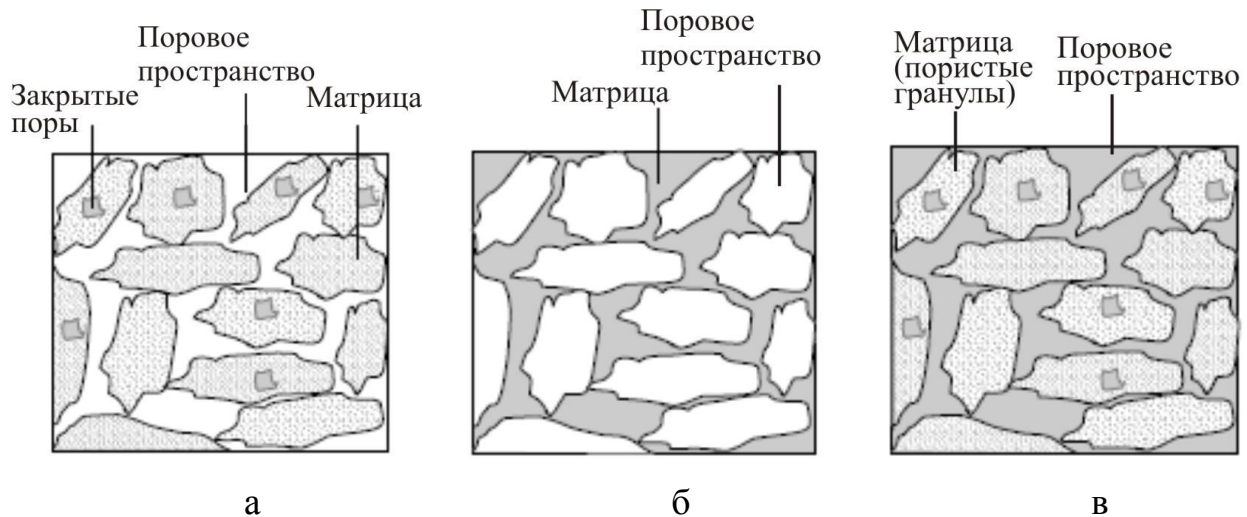


Рисунок 1.1 - Возможные случаи структуры пористого поглотителя:

- а – гранулированная структура; б – вспененная структура;
 в – комбинированная структура с микро- и макропористостью

В первом случае матрица пористого материала образована гранулами твердого материала, которые соединены между собой посредством спекания (склеивания) или плотно упакованы в замкнутый объем. В данном случае могут образовываться достаточно сложные формы поровых каналов, которые главным образом определяются формами гранул. К этому же случаю можно отнести и волокнистые материалы, структура порового канала которых будет рассмотрена далее. Второй случай относится к так называемым вспененным пористым материалам. Здесь образование пористого пространства происходит в процессе протекания газовой фазы через материал матрицы находящийся в жидком агрегатном состоянии. Или же посредством смешивания материала матрицы находящейся в жидком агрегатном состоянии с твердыми частицами. После кристаллизации матрицы происходит химическое растворение материала гранул и образование порового пространства. Третий вариант реализует случай с так называемой микро и макро пористостью и представляет собой комбинацию первых двух случаев образования порового пространства. Здесь гранулы пористого, как правило, вспененного материала с микропористостью соединяются между

собой и образуют макропористость. Так же примером таких поглотителей являются сеточные пористые материалы, нити сеток которых сплетены из тонких волокон [7, 11, 12]. Примеры рассмотренных выше структур пористых материалов представлены на рисунке 1.2.

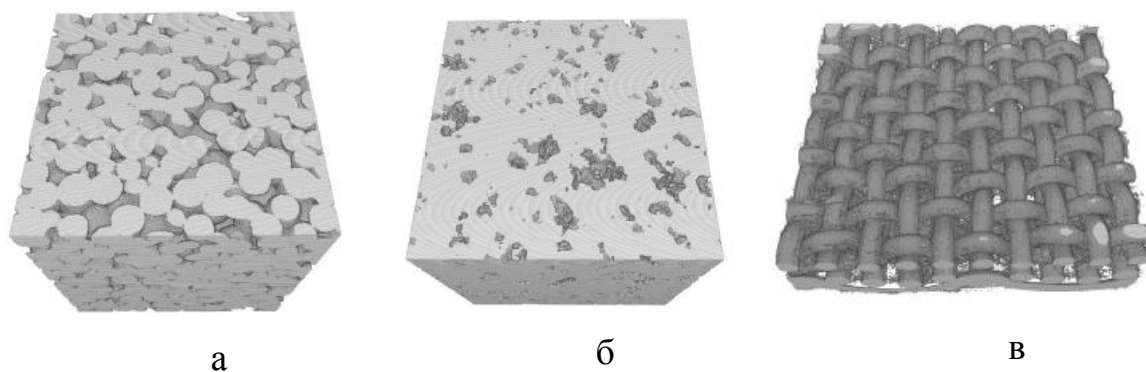


Рисунок 1.2 - Структуры пористых поглотителей:

а – гранулированный поглотитель; б – вспененный поглотитель;
в – сетчатый поглотитель

С точки зрения доступности для теоретического описания и получения образцов со стабильными характеристиками наибольший интерес представляют поглотители со структурой первого типа, когда в качестве гранул образующих матрицу выступают сферические тела, а также плетенные волокнистые поглотители [16, 22, 25]. При этом желательно обеспечить минимальный разброс диаметральных размеров и форм сфер. На рисунке 1.3 показано влияние разброса диаметра сфер на форму порового канала, а также показана форма порового канала для случая, когда в качестве гранул выступают пластинки. Видно, что применение в качестве гранул пластинок, то есть геометрических форм, в которых один из размеров существенно меньше двух других затрудняет получение развитого порового пространства, следовательно, невозможно получение высокопористых поглотителей [17].

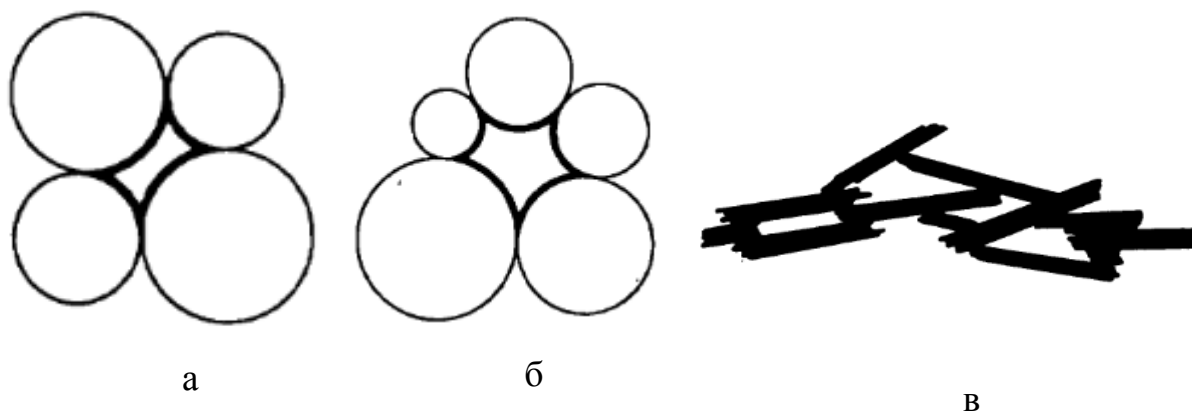


Рисунок 1.3 – Структуры поровых каналов:

а – форма порового канала из четырех гранул разного диаметра;

б – форма порового канала из пяти гранул различного диаметра;

в – формы поровых каналов образованных пластинками

Поглотители из сферических гранул характеризуются полуоткрытыми поровыми каналами, то есть представляют собой сложные объемы, соединенные между собой каналами переменного поперечного сечения со сложной пространственной формой.

Существует три типа пористых материалов: проницаемые, непроницаемые и комбинированные. Выбор типа поглотителя в каждом конкретном случае обуславливается природой и характером пульсаций давления рабочей среды в системе. Необходимо отметить, что проницаемые пористые поглотители также достаточно эффективно поглощают и акустические пульсации давления. Так же возможны комбинированные поглотители, сочетающие в себе проницаемые и непроницаемые поглотители. Такой комбинированный поглотитель конструктивно представляет собой проницаемый поглотитель и установленный за ним фрагмент канала облицованного пористым непроницаемым поглотителем. Однако вместо непроницаемого пористого материала может так же применяться и проницаемый пористый материал [13, 14, 15].

Таблица 1.2 – Характеристики пористых металлов

Основные характеристики	Материал МР	Пористоволокнистые металлические материалы ФГУП "ВИАМ"	Пористый алюминий	Пористо сетчатые материалы	Спеченная бронза
Пористость	0,13...0,95	0,7...0,9	0,78...0,81	0,2...0,65	0,26...0,4
Удельный вес	390-6786 кг/м ³	780-2340 кг/м ³	500-600 кг/м ³	2370-5850 кг/м ³	4680-5772 кг/м ³
Преимущества	Высокий коэффициент звукопоглощения в широком диапазоне частот	Достаточно равномерный спектр поглощения при частотах выше 1,6 кГц	Возможность обработки материала, отсутствие ограничения по размерам	Возможность обработка материала, высокий коэффициент звукопоглощения	Возможность обработки материала
Недостатки	Низкая технологичность	Неустойчив к вибрации	Низкий температурный диапазон эксплуатации	Низкая технологичность, неустойчив к вибрациям	Малый диапазон пористости, неустойчив к вибрации
Внешний вид					

В зависимости от исходных материалов и способа производства пористые материалы получают с пористостью до 0,98 и размером пор от долей микрометра до нескольких миллиметров [11]. Для каждой группы имеется определенная возможность получить материалы с различными характеристиками порового пространства. Некоторые параметры пористых материалов и диапазоны их варьирования представлены в таблице 1.1.

Спечённый пористый волокнистый материал (таблицу 1.1) разработан в ФГУП "ВИАМ". Одним из его недостатков является то, что такой материал неустойчив к вибрациям [11]. Под руководством профессора В.М. Поляевым в МВТУ им. Н. Э. Баумана был разработан пористо сетчатый материал [6].

Технология изготовления пористого алюминия (таблицу 1.1) была разработана на кафедре литейного производства УГТУ-УПИ. Изучению его свойств посвящены работы А.Б. Финкельштейна [20]. Однако, его акустические свойства несколько хуже, чем у пористо-волокнистых материалов [20].

Под руководством профессора А.М. Сойфера в КуАИ был разработан материал МР. Преимущества материала МР (высокие эксплуатационные показатели, широкий температурный диапазон работы и способность работать в агрессивной среде, такой как кислоты, щелочи, газы) обуславливают его область применения [11]. Виброизоляторы из материала МР широко используются в виброзащитных системах. Они имеют высокую прочность, высокий коэффициент рассеивание энергии [7, 8]. Гидродинамические и фильтрационные характеристики МР исследовались в работах Е.А. Изжеурова. Фильтрующие элементы из материала МР изготовленных из проволоки диаметром 30 мкм обеспечивают номинальную тонкость очистки газов до 25 – 30 мкм при толщине фильтрующего материала 10 -15 мм. Материал МР применяют в ЗПК. Нашли применение в технике глушители шума адсорбционного типа. Так, для глушителя дизельного двигателя (типа ЯМЗ-740 и ЯМЗ-236) использована вставка из

MP пористостью 0,8 и толщиной 10 мм, установленная последовательно во впускном тракте. Это позволило снизить шум на различных режимах работы двигателя в широком диапазоне частот [6, 11]. Суммарное снижение шума двигателей достигало 2 – 2,5 дБА.

1.2 Программа для измерения акустических характеристик на импедансной трубе

Язык графического программирования LabVIEW позволяет одновременно генерировать широкополосный шум (белый или розовый) и обрабатывать полученный сигнал с микрофонов, используя математические библиотеки для выполнения акустических расчетов в режиме реального времени.

Приложение генерирует широкополосный шум внутри импедансной трубы, а два микрофона расположенные внутри трубы измеряют акустическое давление. Далее при помощи математических операций определяется передаточную функцию H_{12} между двумя микрофонами, через которую определяются [1]:

- коэффициент отражения (комплексная величина);
- коэффициент звукопоглощения;
- акустический импеданс (комплексная величина);

Все полученные данные LabVIEW переносит на лист Excel (через ActiveX), для последующего создания отчета [2].

Всю работу можно разделить на три раздела:

- генерирование широкополосного шума и получения сигнала с двух микрофонов;
- математические вычисления;
- отображение и хранение результатов;

В первом разделе выбирается необходимый частотный диапазон, он может быть от 150 Гц до 3000 Гц. Такой частотный диапазон определен

условием плоскости волны в импедансной трубе. Этот выбор позволяет пользователю изменить частоту дискретизации в зависимости от его требований. После многочисленных испытаний выбран розовый шум, как наиболее подходящий для существующей конфигурации.

Следующий этап посвящен математической обработке. Стационарные плоские волны, генерируемые динамиком JBL внутри импедансной трубы, измеряются микрофонами в двух точках, расположенными между собой на расстояние s и на расстояние l_1 от тестируемого материала (см. рисунок 1.4) [3].

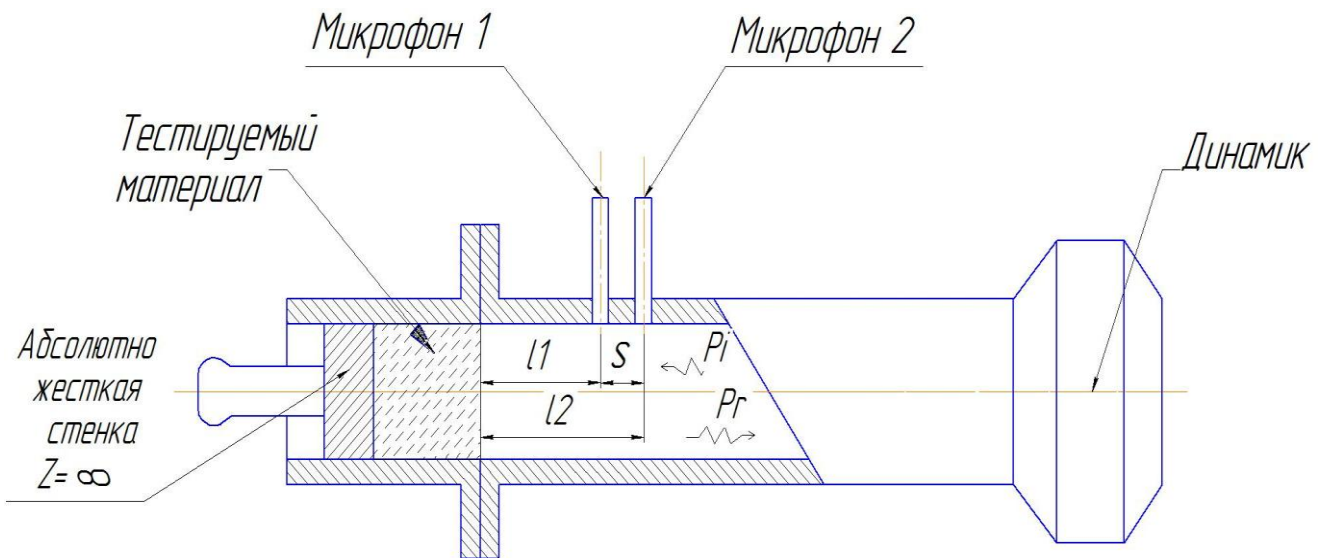


Рисунок 1.4 – Импедансная труба

Переменное избыточное давление, возникающее в упругой среде при прохождении через неё звуковой волны определяется:

$$\begin{aligned} P_1(f) &= A(f) \cdot e^{i \cdot k \cdot l_1} + B(f) \cdot e^{-i \cdot k \cdot l_1} \\ P_2(f) &= A(f) \cdot e^{i \cdot k \cdot l_2} + B(f) \cdot e^{-i \cdot k \cdot l_2} \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$k = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c_0} \quad (1.2)$$

А и В коэффициенты которые зависят от частоты прямой и обратной волны, k волновое число, и $j = \sqrt{-1}$. $P_1(f), P_2(f)$ сигнал улавливаемый из двух микрофонов.

Далее используя блок **frequency Response**, получаем передаточную функцию между двумя микрофонами $H_{12}(f)$ [4,5]:

$$H_{12}(f) = \frac{e^{i \cdot k \cdot l_2} + R(f) \cdot e^{-i \cdot k \cdot l_2}}{e^{i \cdot k \cdot l_1} + R(f) \cdot e^{-i \cdot k \cdot l_1}} \quad (1.3)$$

Далее из передаточной функции получаем коэффициент отражения звука $R(f)$:

$$R(f) = \frac{H_{12} - e^{-i \cdot k \cdot s}}{e^{i \cdot k \cdot s} - H_{12}} \cdot e^{i \cdot 2 \cdot k \cdot (l_1 + s)} \quad (1.4)$$

Из коэффициента отражения мы можем получить остальные параметры, а именно:

- коэффициент звукопоглощения: $\alpha(f) = 1 - |R(f)|^2$ (1.5)

- акустический импеданс: $Z(f) = \rho_0 \cdot c_0 \cdot (1 + R(f)) / (1 - R(f))$ (1.6)

В вышеупомянутых выражениях ρ_0 плотность воздуха, c_0 скорость звука в воздухе. Следует отметить, что коэффициент поглощения, который мы нашли выше, является вещественной частью. На рисунке 1.5 показана последовательность, вычисления акустические свойства материалов

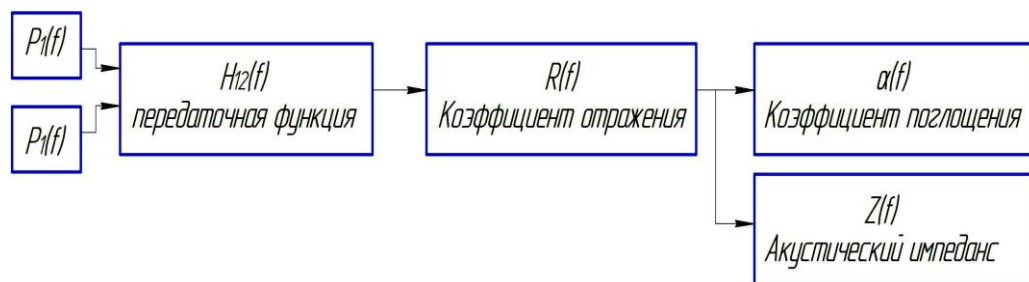


Рисунок 1.5 – Последовательность расчетов

2 Моделирование акустических характеристик упругопористого материала МР

2.1 Математическая модель сопротивления продуванию упругопористого материала МР

Удельное сопротивление продуванию или, как его иногда называют, гидравлическое сопротивление, является важной характеристикой пористого материала, которая существенно влияет на его акустические характеристики, поскольку в значительной степени определяет потери звуковой энергии в звукопоглощающих материалах вследствие вязкого трения при движении газа в его порах. Особо важное значение удельного сопротивления продуванию приобретает при установке звукопоглощающего материала последовательно газовому потоку в глушителях шума энергетических установок, так как в большинстве случаев это приводит к ухудшению мощностных и энергетических показателей этих установок.

В оценке эффективности звукопоглощающих материалов принято использовать величину удельного сопротивления продуванию r , которое определяется отношением [10]:

$$r = \frac{\Delta p \cdot A}{h \cdot q_v} \quad (2.1)$$

где Δp – перепад давления на пористом слое;

A – площадь поперечного сечения образца;

q_v – объемная скорость потока воздуха;

h – толщина образца в направлении потока воздуха.

В таблице 2.1 приведены значения удельного сопротивления продуванию измеренного в [12]:

1) акустическим методом.

Метод заключается в прохождении медленно меняющегося потока воздуха через образец, имеющий форму кругового цилиндра или прямоугольного параллелепипеда, и измерении переменной составляющей давления в испытательном объеме, ограниченном образцом (рисунок 2.1) [10];

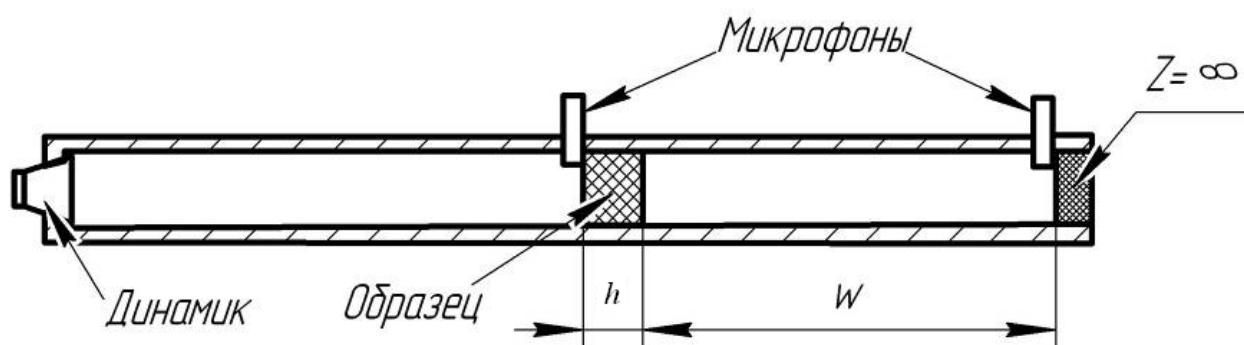


Рисунок 2.1 – Метод определения сопротивления продуванию переменным потоком воздуха

2) в постоянном потоке.

Метод заключается в прохождении регулируемого однонаправленного потока воздуха через образец, имеющий форму кругового цилиндра или прямоугольного параллелепипеда, и измерении перепада давления между двумя свободными лицевыми поверхностями образца (рисунок 2.2) [10].

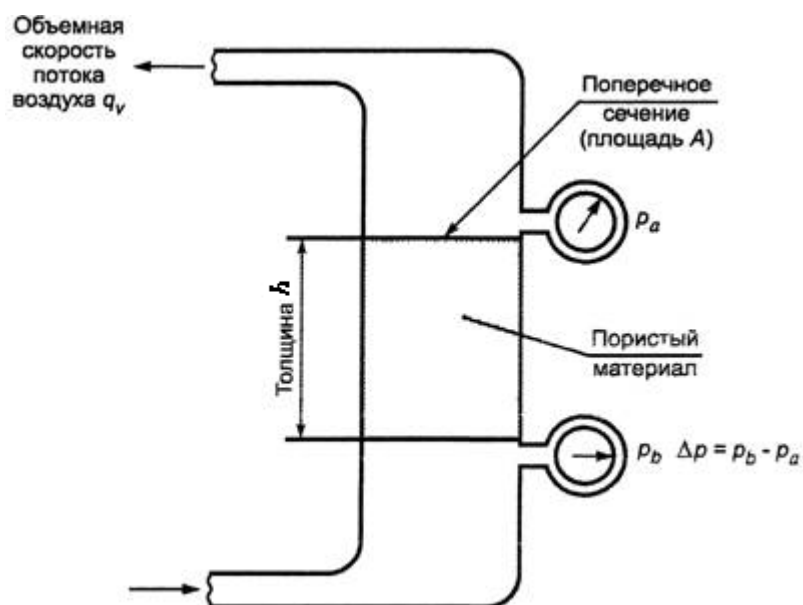


Рисунок 2.2 – Метод определения сопротивления продуванию постоянным потоком воздуха

Таблица 2.1 – Значения удельного сопротивления продуванию

MP	Измерение акустическим методом (КПа·с/м ²)	Измерение в постоянном потоке (КПа·с/м ²)
$P= 0,6; d_{II}= 0,2$ мм	31,5	28
$P= 0,8; d_{II}= 0,2$ мм	2,94	2,7
$P= 0,6; d_{II}= 0,12$ мм	70	64
$P= 0,8; d_{II}= 0,12$ мм	8,5	9,2
<i>Примечание.</i>		
<i>P – пористость образца, под которой понимается характеристика материала, совокупная мера размеров и количества пор в твёрдом теле, d_{II} – диаметр проволоки, из которой изготовлены образцы.</i>		

Имеется расхождение результатов измерения акустическим методом и в постоянном потоке, это связано с использованием различных средств измерения давления. В потоке измерялось давление менее точными датчиками это связано с более высоким значением давлениями по сравнению

с акустическим методом. Использование более точных датчиков давления в акустическом методе считается более точным методом и используются эти данные для разработки математической модели.

На основании этих экспериментальных данных для определения удельного сопротивления продуванию пористого материала МР построена эмпирическая математическая модель [12]:

$$r = \frac{A \cdot (1 - \Pi)^2}{2 \cdot \Pi^3 \cdot d_{\Pi}^2} \cdot \eta_{\text{возд.}}$$

где $\eta_{\text{возд.}}$ – коэффициент динамической вязкости воздуха;

$$d_{\Gamma} = \frac{\Pi \cdot d_{\Pi}}{(1 - \Pi)},$$

где d_{Γ} – гидравлический диаметр материала МР[7];

ρ_m – насыпная плотность:

$$\rho_m = (1 - \Pi) \cdot \rho,$$

ρ – плотность материала, из которого изготовлена проволока;

$A = 153$ – экспериментальный коэффициент для материала МР.

Недостатками такой модели является то, что коэффициент удельного сопротивления продуванию зависит от двух параметров: от пористости и диаметра проволоки, что усложняет анализ закономерностей изменения акустических характеристик материала МР.

Для устранения указанных недостатков мной предложена новая математическая модель, которая зависит только от одного параметра материала МР.

2. Разработанная математическая модель

$$r = \frac{K_1}{d_{\Gamma}^{K_2}} \cdot \frac{\eta_{\text{сп.}}}{\eta_{\text{возд.}}},$$

где K_1 , K_2 – экспериментально определенные коэффициенты, зависящие от материала.

На основании таблицы 2.2 и экспериментальных данных работы [11, 12] определены коэффициенты K_1 , K_2 :

$$K_1 = 0.002; K_2 = 2.01.$$

Графическое сравнение результатов расчета по эмпирической модели [11] и предложенной модели с данными эксперимента представлено на рисунк 2.3.

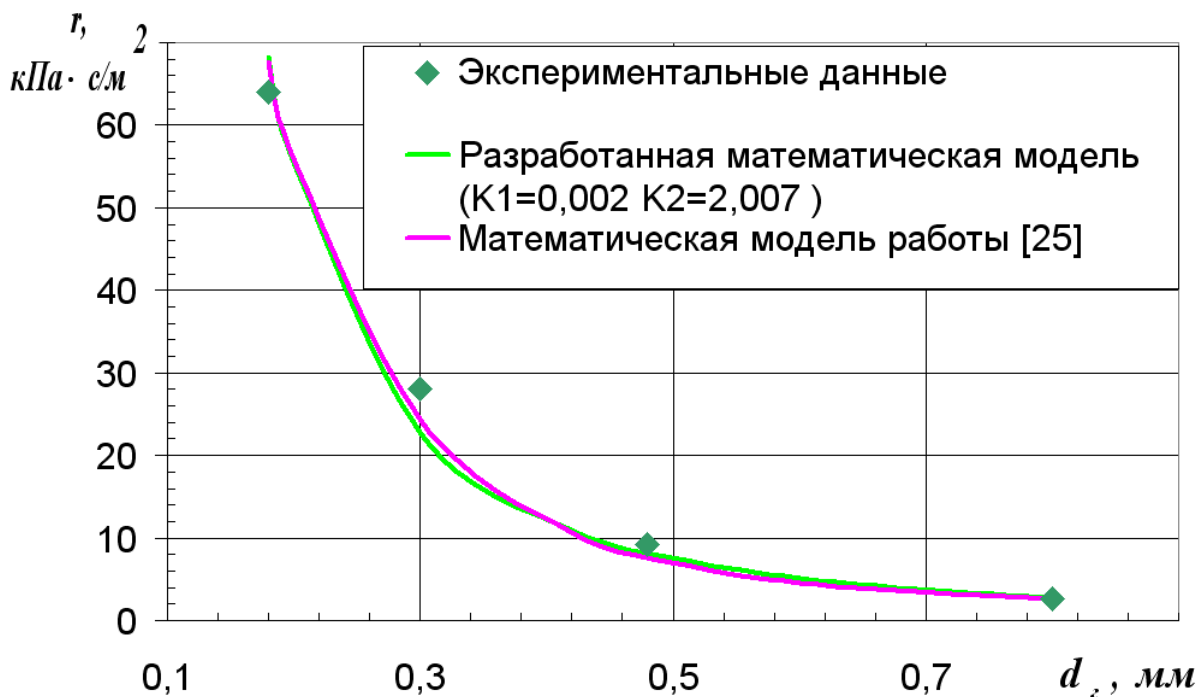


Рисунок 2.3 – Сравнение расчётных и экспериментальных зависимостей удельного сопротивления продуванию от гидравлического диаметра МР

Из рассмотрения зависимостей, представленных на рисунке 2.3 и анализа математической модели работы [11] и разработанной модели можно сделать следующие выводы:

1 Расчётные данные, полученные с помощью математической модели работы [11] и разработанной математической модели, хорошо согласуются с экспериментальными значениями.

2 Разработанная математическая модель коэффициента сопротивления продуванию зависит от одного параметра - гидравлического диаметра, что,

как будет показано далее, позволяет упростить анализ закономерностей изменения акустических характеристик материала МР.

3 С увеличением гидравлического диаметра происходит монотонное снижение удельного сопротивления продуванию (по степенной зависимости).

Использование величины сопротивления продуванию для определения толщины звукопоглощающей конструкции

Полученные данные по значению сопротивления продуванию упругопористого материала МР необходимо использовать для определения потребной толщины звукопоглощающей конструкции из этого материала. При этом следует исходить из ниже изложенных рекомендаций.

Согласно работе [21] наибольший коэффициент звукопоглощения получается при условии: $2\rho_0 \cdot c_0 \leq r_l \leq 4\rho_0 \cdot c_0$

где $r_l = r \cdot h$ – полное сопротивление продувания пористого материала.

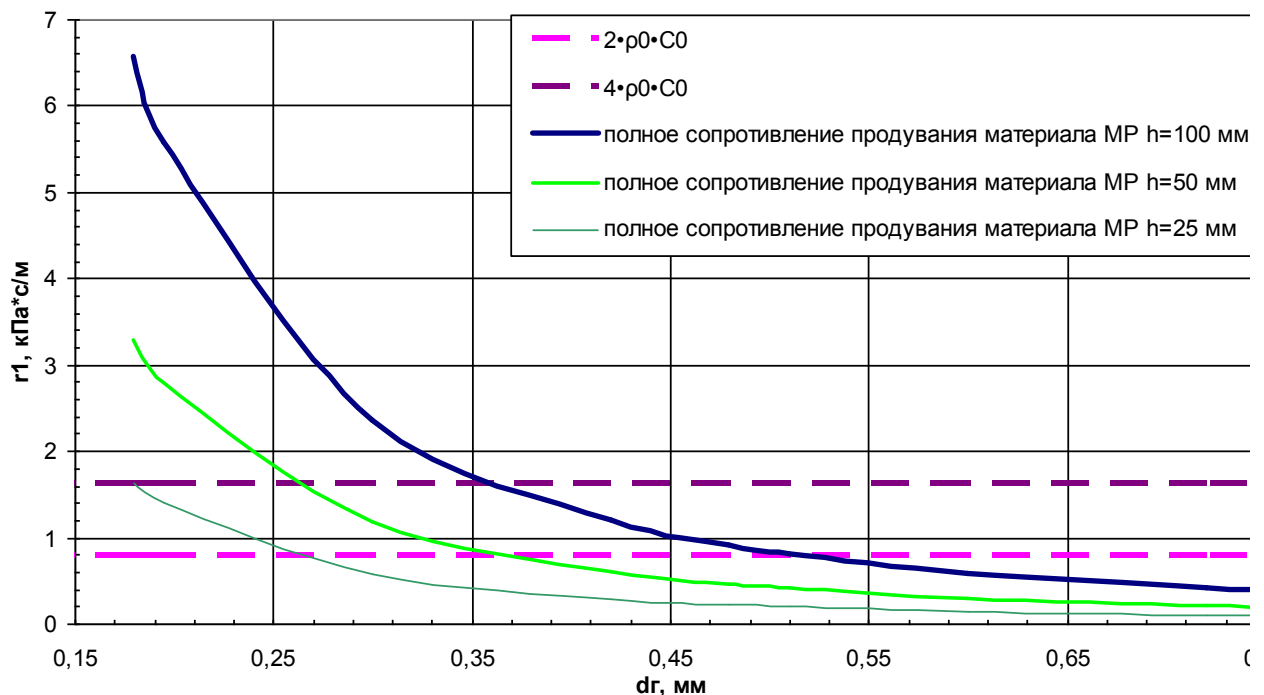


Рисунок 2.4 – Полное сопротивление продуванию упругопористого материала МР и сравнение с условиями наилучшего звукопоглощения

Согласно графику представленную на рисунке 2.4, наилучший коэффициент звукопоглощения материала МР при толщине 100 мм имеет для гидравлического диаметра 0,36 мм – 0,47 мм. Для толщины 50 мм наилучший коэффициент звукопоглощения имеет при гидравлического диаметра 0,26 мм – 0,36 мм. Наилучший коэффициент звукопоглощения материала МР 25 мм имеет при гидравлическом диаметре 0,16 мм – 0,26 мм.

2.2 Математическая модель для расчета акустических характеристик упругопористого материала МР

В виду сложности теоретического описания акустических процессов в пористых средах известно множество эмпирических и полуэмпирических зависимостей. В результате интенсивных исследований и лабораторных измерений в 1970 году Delany и Bazley опубликовали эмпирические зависимости определения постоянной распространения γ и характеристического импеданса Z_C , для волокнистых материалов [24].

$$\gamma = \left(j \frac{\omega}{c_0} \right) \left[1 + 0.0978 \cdot B^{-0.7} - j \cdot 0.189 \cdot B^{-0.595} \right]; \quad (2.1)$$

$$Z_C = \rho_0 c_0 \left[1 + 0.0571 \cdot B^{-0.754} - j \cdot 0.087 \cdot B^{-0.732} \right]; \quad (2.2)$$

где B – безразмерная частотно-зависимая переменная: $B = \frac{\rho_0 f}{r}$;

ρ_0 – плотность среды,

f – частота,

r – удельное сопротивление продуванию,

c_0 – скорость звука.

Недостатком данных зависимостей является необходимость определения параметра пористой среды, называемого удельным сопротивлением продуванию r . Сложность применения зависимостей (2.2) и (2.3) заключается в том, что точно продуваемость пористого материала, как правило, приходится определять экспериментальным путем. Кроме того, недостатком

данных зависимостей является уникальность коэффициентов при безразмерной частотно-зависимой переменной B , характерных для конкретного волокнистого материала и зависящих от диаметра волокон, их формы, структуры укладки и плотности укладки.

Позднее эмпирические зависимости (2.2) и (2.3) были обобщены и представлены в следующем виде [24]:

$$Re\gamma = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[C_5 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-C_6} \right]; \quad (2.3)$$

$$ReZ_c = \rho_0 c_0 \left[1 + C_1 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-C_2} \right]; \quad (2.4)$$

$$Im\gamma = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[1 + C_7 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-C_8} \right]; \quad (2.5)$$

$$ImZ_c = -\rho_0 c_0 \left[C_3 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-C_4} \right], \quad (2.6)$$

где $Re\gamma$ – действительная часть постоянной распространения;

ReZ_c – действительная часть характерного импеданса;

$Im\gamma$ – мнимая часть постоянной распространения;

ImZ_c – мнимая часть характерного импеданса.

Зависимости (2.3 – 2.6) для различных материалов отличаются восемью коэффициентами $C_1 – C_8$, характерными для каждого типа материала.

Удельное сопротивление продуванию или, как его иногда называют, гидравлическое сопротивление, является важной характеристикой пористого материала, которая существенно влияет на его акустические характеристики, поскольку оно в значительной степени определяет потери звуковой энергии в звукопоглощающих материалах вследствие вязкого трения при движении газа в его порах. Особо важное значение приобретает удельное сопротивление продуванию при установке звукопоглощающего материала

последовательно газовому потоку в глушителях шума энергетических установок, так как в большинстве случаев это приводит к ухудшению мощностных и энергетических показателей этих установок.

Математическая модель для определения коэффициента звукопоглощения (при нормальном падении) была получена из известных формул Delany - Bazley [24], и оптимизировано для различных типов упругопористых материалов МР:

Для разработки математической модели акустических характеристик упругопористого материала МР были использованы уравнения (2.3-2.6), в которых определены восемь коэффициентов $C_1...C_8$ (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Коэффициенты математической модели акустических свойств МР

C_1	C_2	C_3	C_4
0,057	0,754	0,087	0,732
C_5	C_6	C_7	C_8
0,169	0,595	0,098	0,700

Используя характеристический импеданс и постоянную распространения, коэффициент звукопоглощения и импеданс могут быть легко получены с использованием известных формул [18]. В случае, когда слой звукопоглощающего материала толщиной h расположен непосредственно у жесткой стенки входной импеданс определяется:

$$Z_{ex} = Z_C \cdot ctg(\gamma \cdot h),$$

Коэффициент звукопоглощения слоя определяется по формуле:

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_{ex} - Z_0}{Z_{ex} + Z_0} \right|^2, \quad (2.7)$$

где Z_0 - импеданс среды.

На основе математической модели Delany-Bazley, была разработана собственная математическая модель, описывающая акустические характеристики упругопористого материала МР, что позволяет сократить время на проектирование звукопоглощающих конструкций на основе материала МР. Некоторые результаты расчетов представлены на рисунках 2.5–2.9.

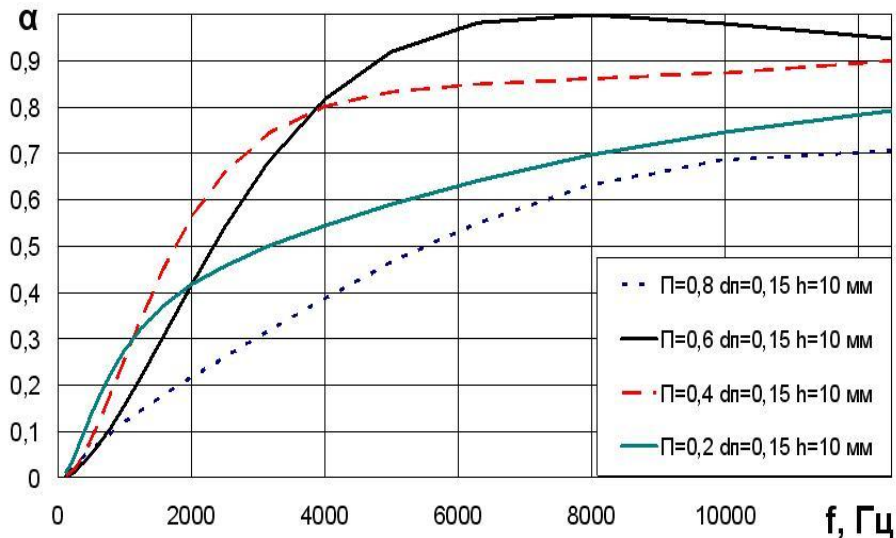


Рисунок 2.5 – Частотная зависимость коэффициента звукопоглощения упругопористого материала МР в зависимости от пористости ($d_{II} = 0,15$ мм; $h=10$ мм)

С уменьшением пористости с 0,8 до 0,6 коэффициент звукопоглощения образцов из проволоки $d_{II} = 0,2$ мм толщиной $h=10$ мм возрастает. Однако, очевидно, данная тенденция будет до определенных пределов, после которых уменьшение пористости будет приводить к уменьшению коэффициента звукопоглощения.

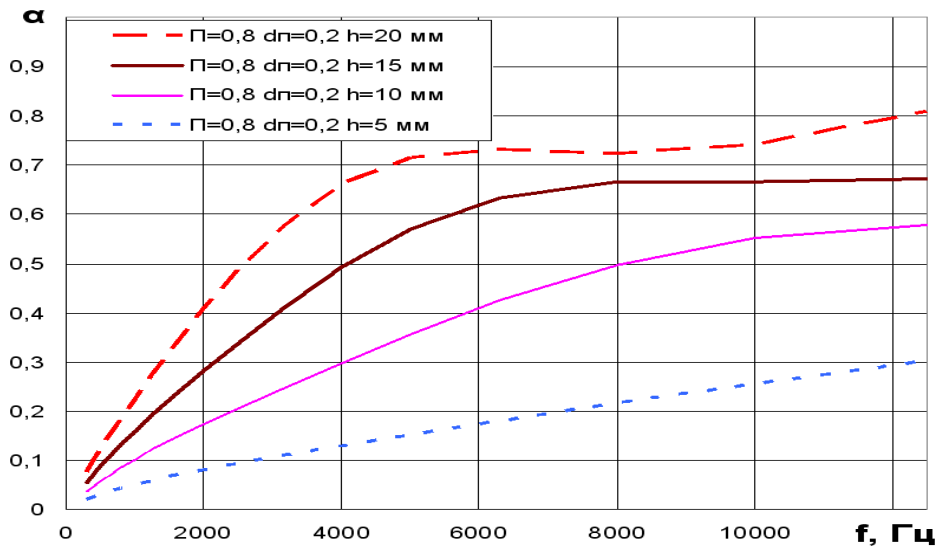


Рисунок 2.6 – Частотная зависимость коэффициента звукопоглощения упругопористого материала МР в зависимости от толщины образца ($\Pi = 0,8$; $d_{п} = 0,2$ мм)

С увеличением толщины материала МР с 5 до 20 мм, при диаметром проволоки $d_{п} = 0,2$ мм и пористости 0,8 коэффициент звукопоглощения возрастает. Однако, очевидно, данная тенденция будет иметь тенденцию до определенных пределов, после которых коэффициент звукопоглощения будет постоянным в независимости от увеличения толщины МР.

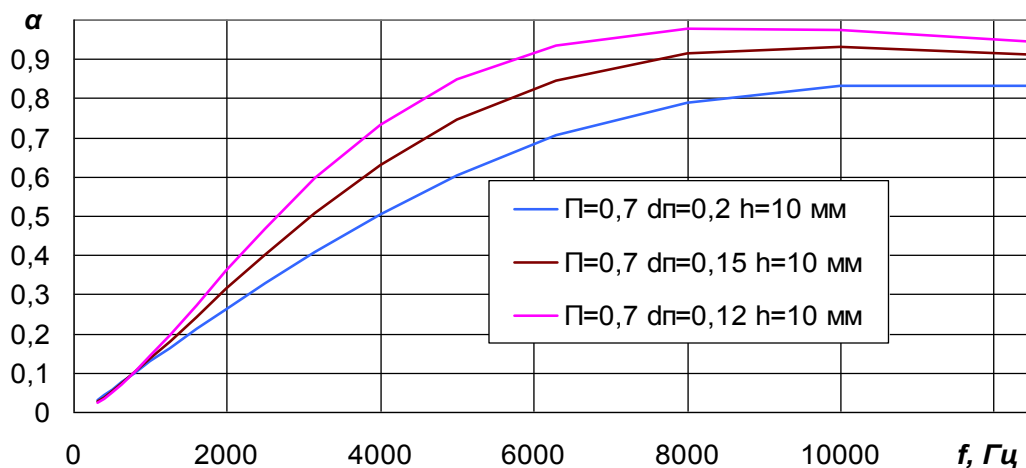


Рисунок 2.7 – Частотная зависимость коэффициента звукопоглощения упругопористого материала МР в зависимости от диаметра проволоки ($\Pi = 0,7$; $h = 10$ мм)

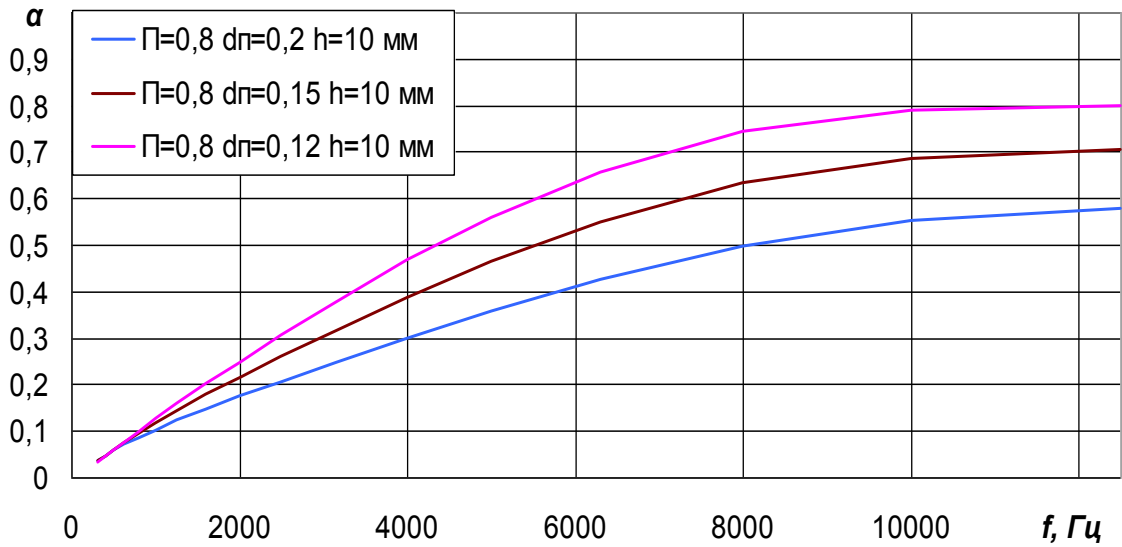


Рисунок 2.8 – Частотная зависимость коэффициента звукопоглощения упругопористого материала МР в зависимости от диаметра проволоки ($\Pi=0,8$; $h=10$ мм)

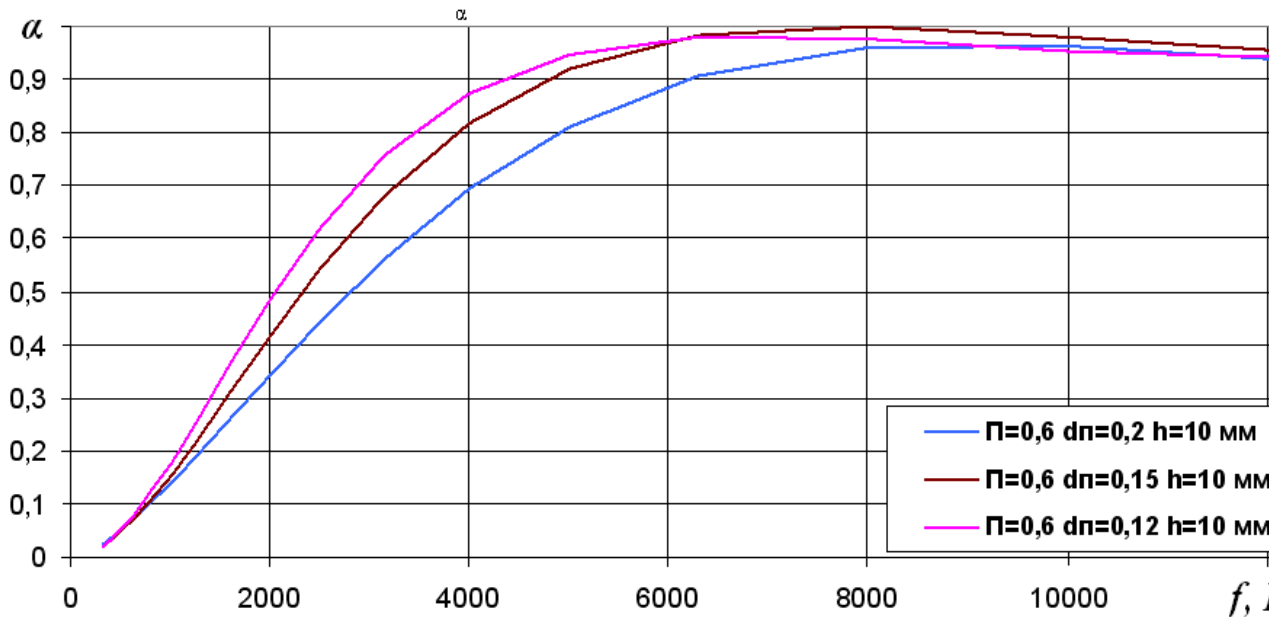


Рисунок 2.9 – Частотная зависимость коэффициента звукопоглощения упругопористого материала МР в зависимости от диаметра проволоки ($\Pi=0,6$; $h=10$ мм)

Уменьшение диаметра проволоки (рисунки 2.5-2.7) приводит к увеличению коэффициента звукопоглощения звукопоглощающей конструкции не зависимо от пористости.

По разработанной математической модели, описывающей акустические характеристики материала МР, был рассчитан индекс звукопоглощения Noise Reduction Coefficient (NRC) [19, 23]:

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4},$$

где α_i – коэффициент звукопоглощения в октаве со среднегеометрической частотой i .

Графическое изображение зависимости NRC от толщины образца h и его гидравлического диаметра d_2 представлено на рисунке 2.10.

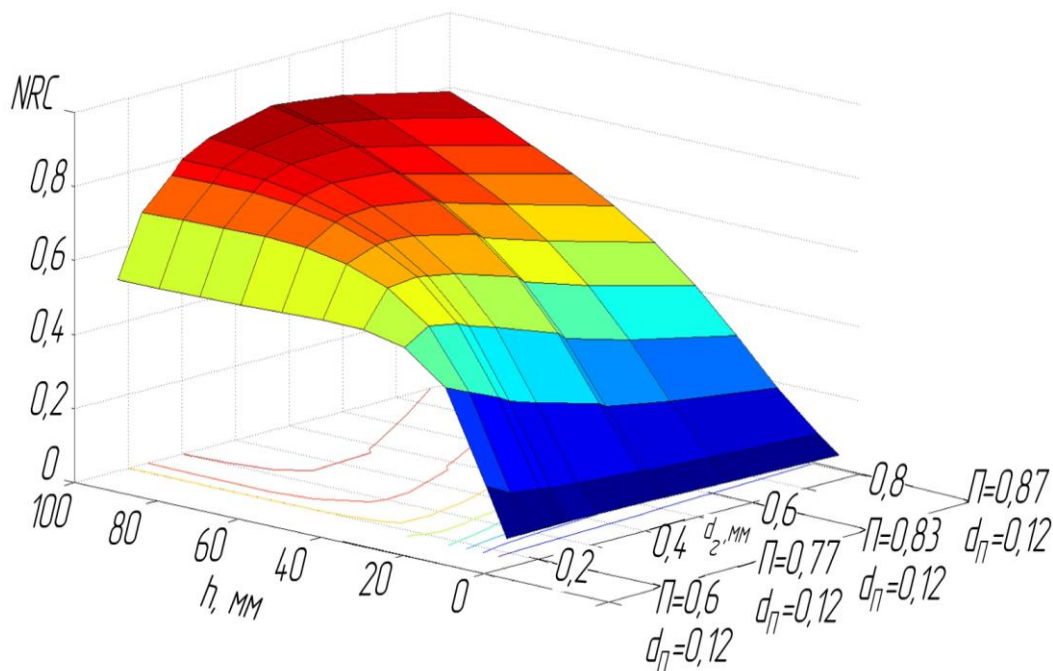


Рисунок 2.10 – Зависимость NRC образцов из материала МР от толщины образца h и гидравлического диаметра d_2

Анализируя рисунок 2.10 можно сделать вывод, что индекс звукопоглощения NRC растет с увеличением толщины образца, но только до определенного значения, свыше которого он остается постоянным. Важно также отметить, что есть максимальное значение NRC при определенном гидравлическом диаметре.

3. Экспериментальные исследования акустических характеристик упругопористого материала МР

3.1. Оборудование и программное обеспечение

- Программный комплекс: LabVIEW, sound and vibration toolset;
- Модуль NI USB-4431;
- 2 микрофона РСВ 377В02;
- Динамик JBL 2426J;
- Импедансная труба фирмы Spectronics.

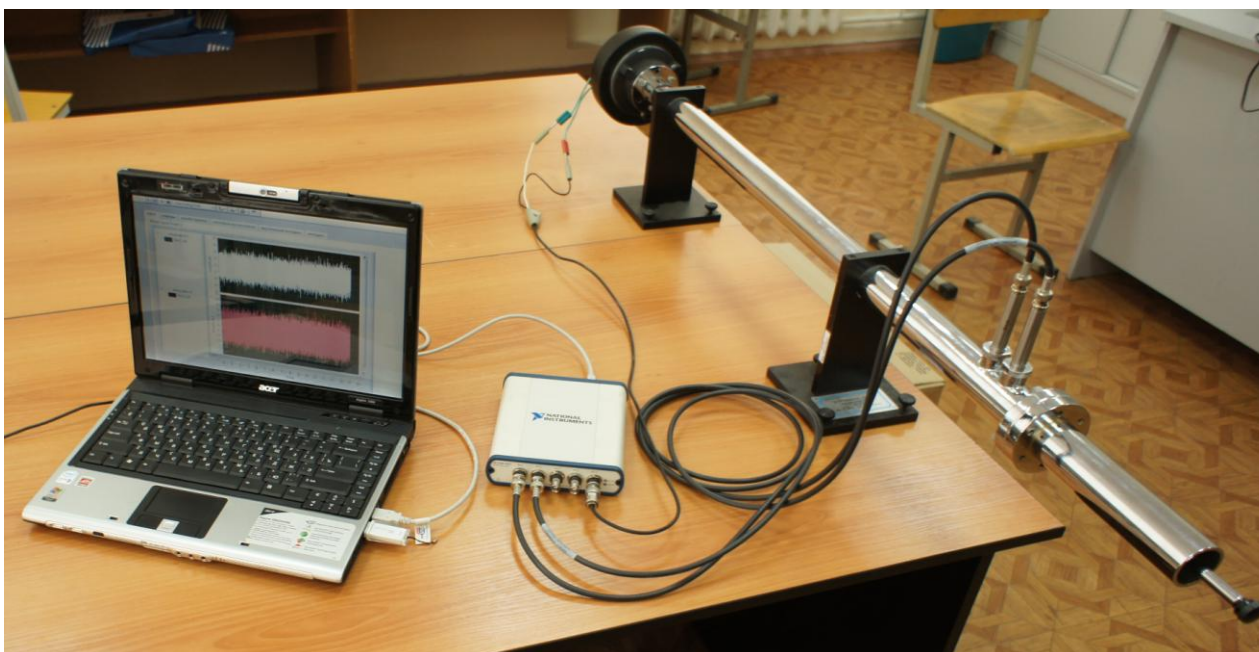


Рисунок 3.1 – Внешний вид установки

Для генерации широкополосного шума и обработки сигналов с микрофонов используем модуль NI USB – 4431(рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Модуль NI 4431

NI USB-4431 - пятиканальный модуль сбора динамических сигналов предназначенный для выполнения высокоточных измерений сигналов с интегральных электронных пьезоэлектрических датчиков (IEPE). Модуль имеет в своём составе четыре одновременно работающих 24-разрядных дискретных каналов аналогового ввода и один 24-разрядный канал аналогового вывода. За счет своей портативности, NI USB-4431 также хорошо приспособлен для использования в широком диапазоне эксплуатационных испытаний, таких как исследование АЧХ аудио устройств или вибродиагностика. Кроме того, прибор имеет динамический диапазон измерений 100 дБ, а также возможность программного выбора цепей согласования сигналов с пьезоэлектрических датчиков, акселерометров и микрофонов.

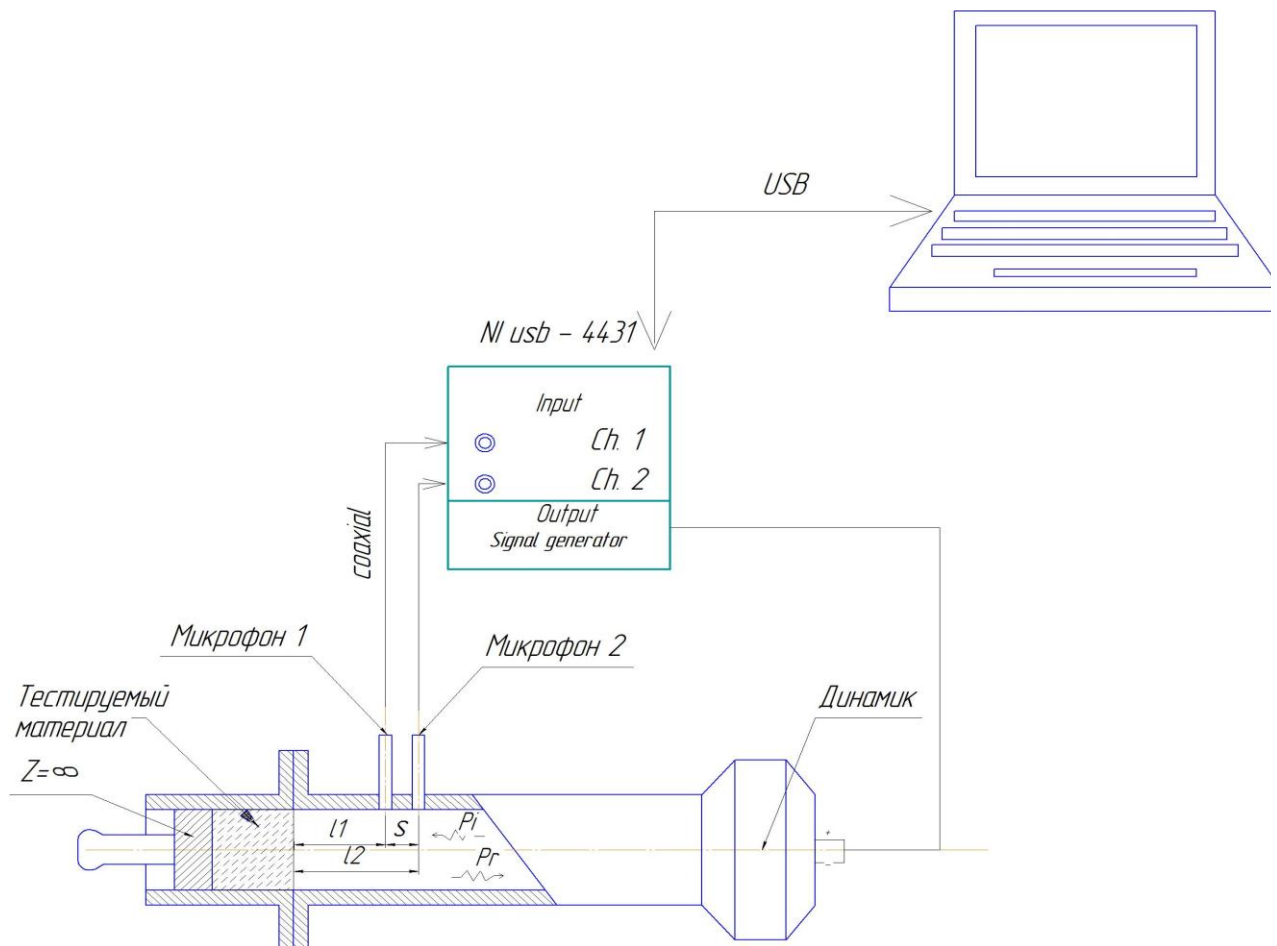


Рисунок 3.3 – Экспериментальная установка для оценки акустических свойств материалов с двумя микрофонами

3.2 Порядок создания программы для измерения коэффициента звукопоглощения

Для создания программы по измерению коэффициента звукопоглощения необходимо выполнить следующие действия:

- а) Запустить программный комплекс LabVIEW. В появившемся окне выбирать опцию Blank VI (см. рисунок 3.4).

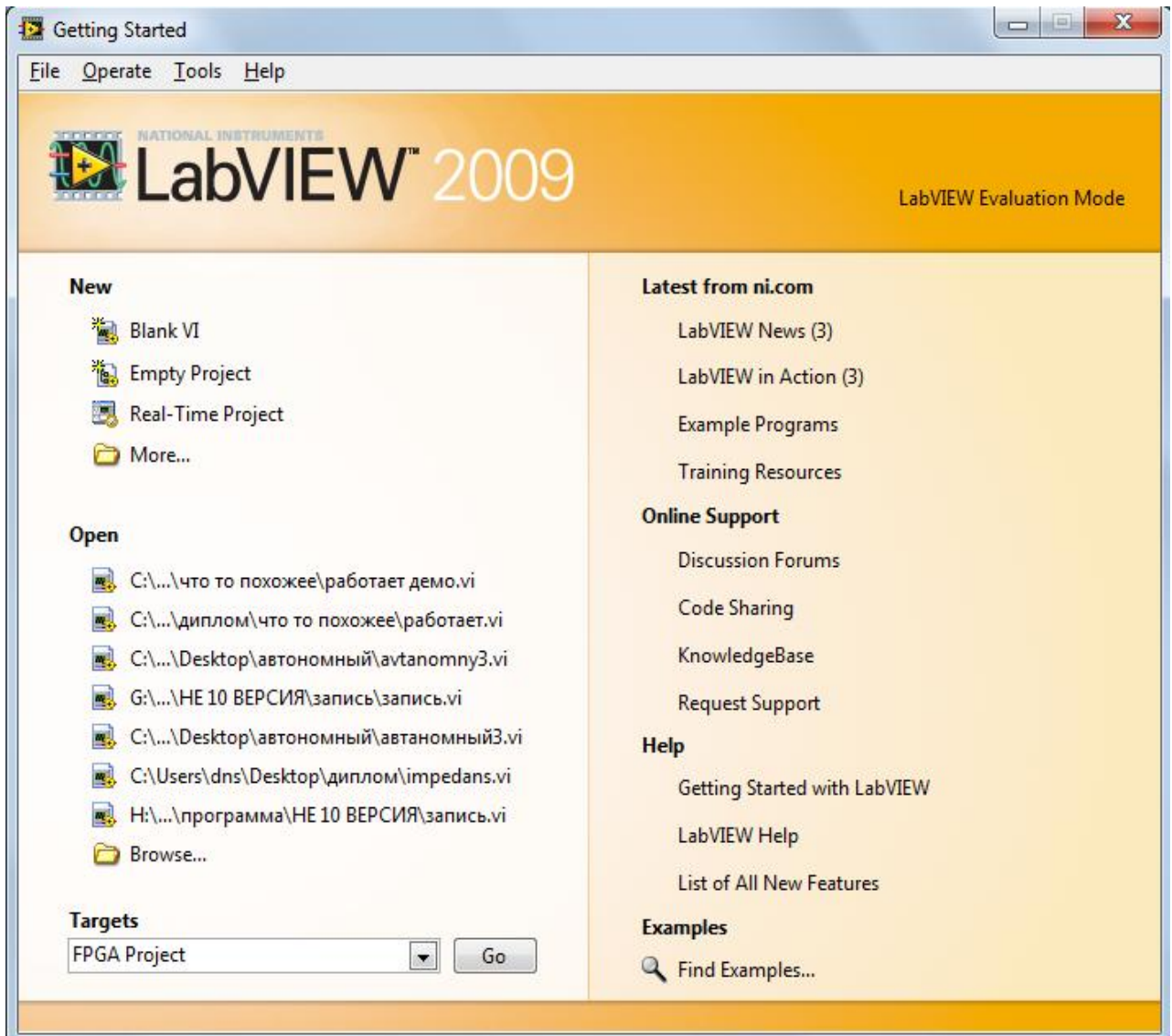


Рисунок 3.4 – Стартовое окно LabVIEW

Перед вами откроется два основных окна программы (**front panel, block diagram**) удобно переключаться м/у окнами используя сочетания клавиш **Ctrl+E**

б) Вся программа будет работать в цикле, который является аналогом оператора "While". Условием выхода из цикла будет нажатие на кнопку останова. Перейти в **block diagram** активировать функциональное меню (**View >> Functions Palette**) в функциональном меню (**Functions**) выбрать **Express >> Execution control >> While Loop** (см. рисунок 3.5)

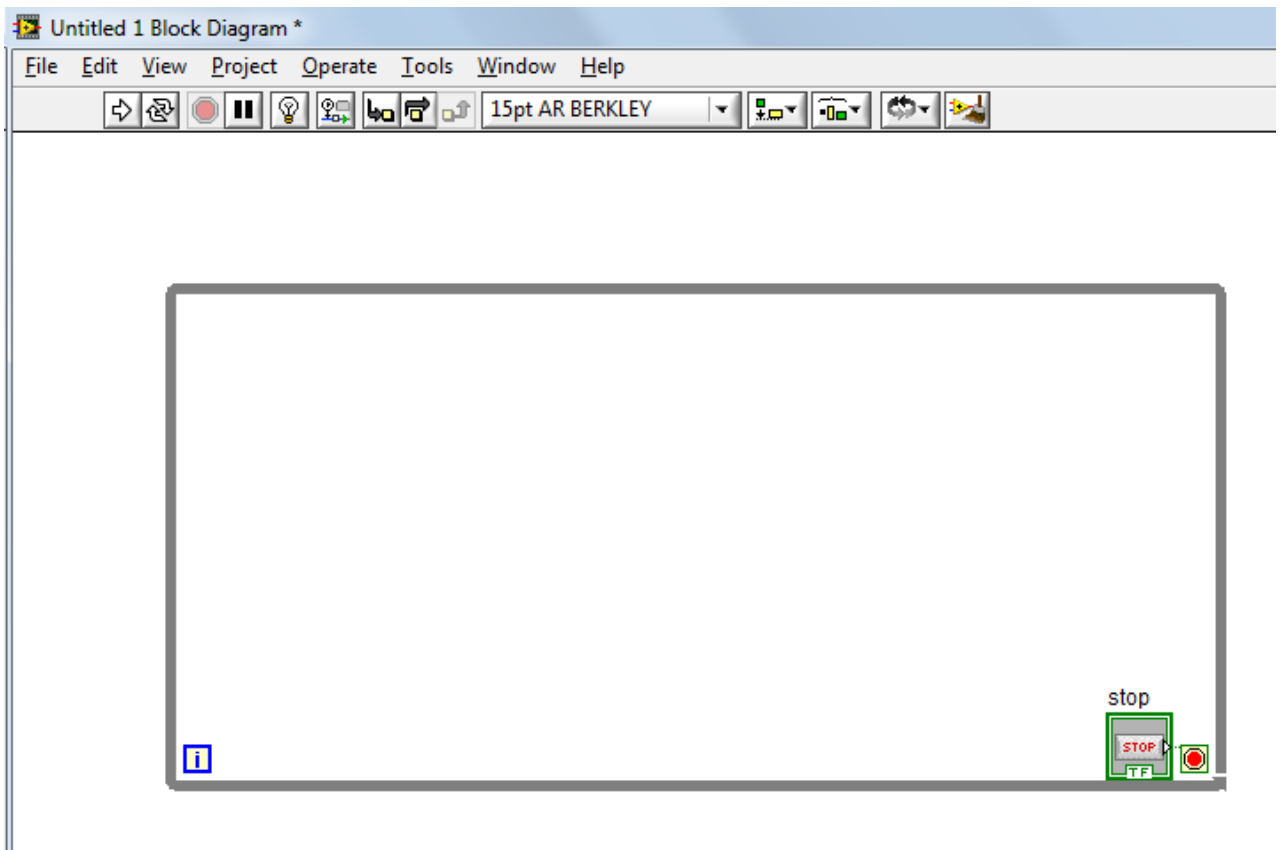



Рисунок 3.5 – Внутренний алгоритм программы на данном этапе

в) Создать блок **DAQ Assistant** (при этом Модуль NI USB 4431 должен быть подключен к компьютеру). В случае отсутствия подключения к модулю NI USB 4431 переходим сразу в раздел **е**. Войти в список блоков, и выбирать **Signal Express >> Acquire Signals >> DAQ Assistant** (см. рисунок 3.3) в открывшемся окне выбираем **Acquire Signals >> Analog Input >> Sound Pressure**. Далее выбрать вход, в который подключен первый микрофон (**ai0, ai1, ai2, ai3**), и нажать **finish** (рисунок 3.6)



Рисунок 3.6 – Окно настройки блока **DAQ Assistant**

Произвести настройку первого микрофона. Прописать его чувствительность в графе **Sensitivity** (она написана в паспорте микрофона).

Добавить второй микрофон, в этом же меню нажать на  и выбрать **Sound Pressure**. Далее выбрать вход, в который подключен второй микрофон (**ai0, ai1, ai2, ai3**). В графе **Samples to Read** и **Rate (Hz)** установить частоту дискретизации **6400**, с которой будут работать микрофоны.

в) Если отсутствует подключение к модулю, то необходимо обрабатывать ранее записанный сигнал. Для этого в замен блока **DAQ Assistant** выбрать следующие блоки. Первый блок служит для выбора файла сигнала, переходим в **front Panel**. Войти в меню блоков и выбрать **modern >> string & Path >> File Path Control**. Поставить этот блок в удобное место.

Перейти в Block Diagram, войти в меню блоков и выбрать **Sound and Vibration >> File I/O >> TDMS >> TDMS Streaming >> TDMS Open**. Поставить этот блок рядом с File Path Control. Выбрать **Sound and Vibration >> File I/O >> TDMS >> TDMS Streaming >> TDMS get Properties**. Поставить этот блок рядом с TDMS Open. Выбрать **Sound and Vibration >> File I/O >> TDMS >> TDMS Streaming >> TDMS read Properties**. Поставить этот блок рядом с TDMS get Properties. Далее соединить все как показано на рисунке 3.7.

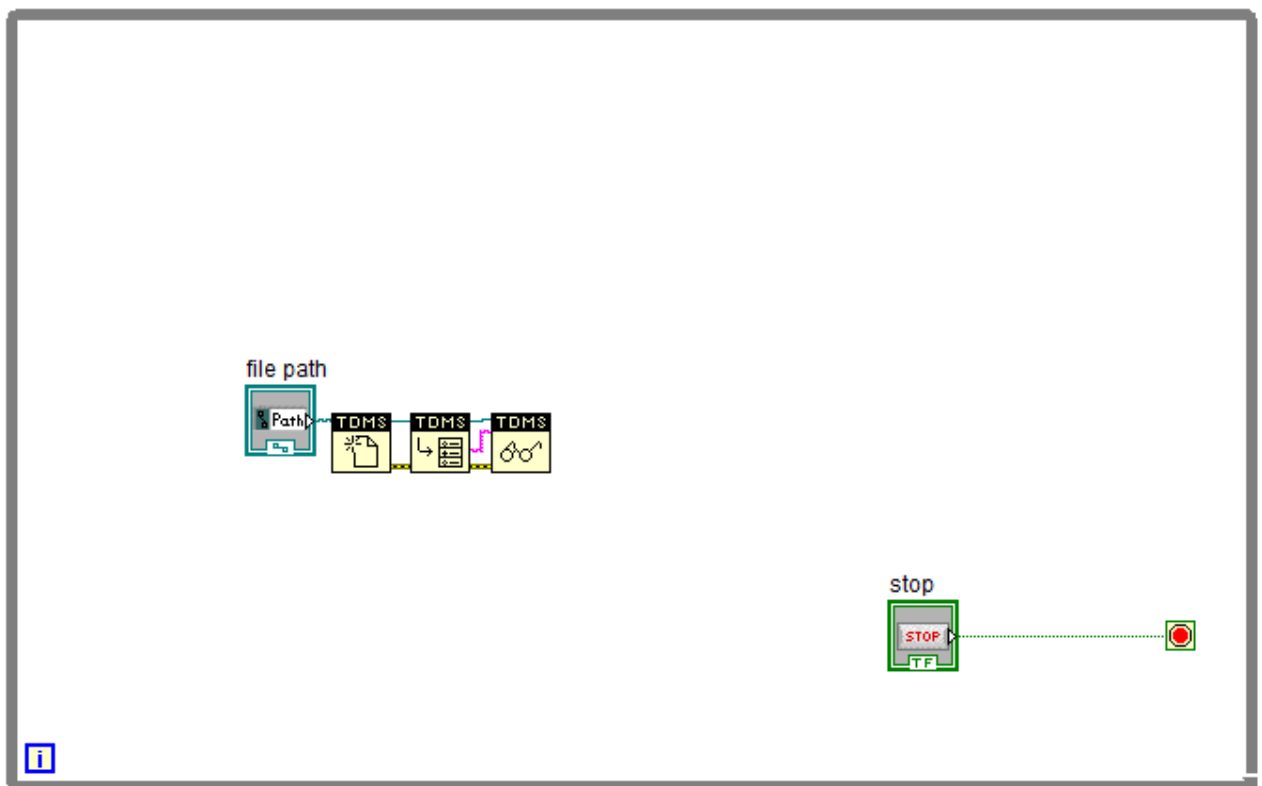


Рисунок 3.7 – внутренний алгоритм программы на данном этапе

С помощью описанных в этом пункте действий произведена замена блока **DAQ Assistant** для обработки записанного ранее сигнала, из блока **TDMS read Properties**. С выхода Data на данном блоке будет идти сигнал. Далее выполнить все по пунктам исключив пункт г.

г) Теперь оба микрофона настроены и готовы к работе. Для удобства растянуть блок **DAQ Assistant** до конца. Соединить все блоки как показано на рисунке 3.8.

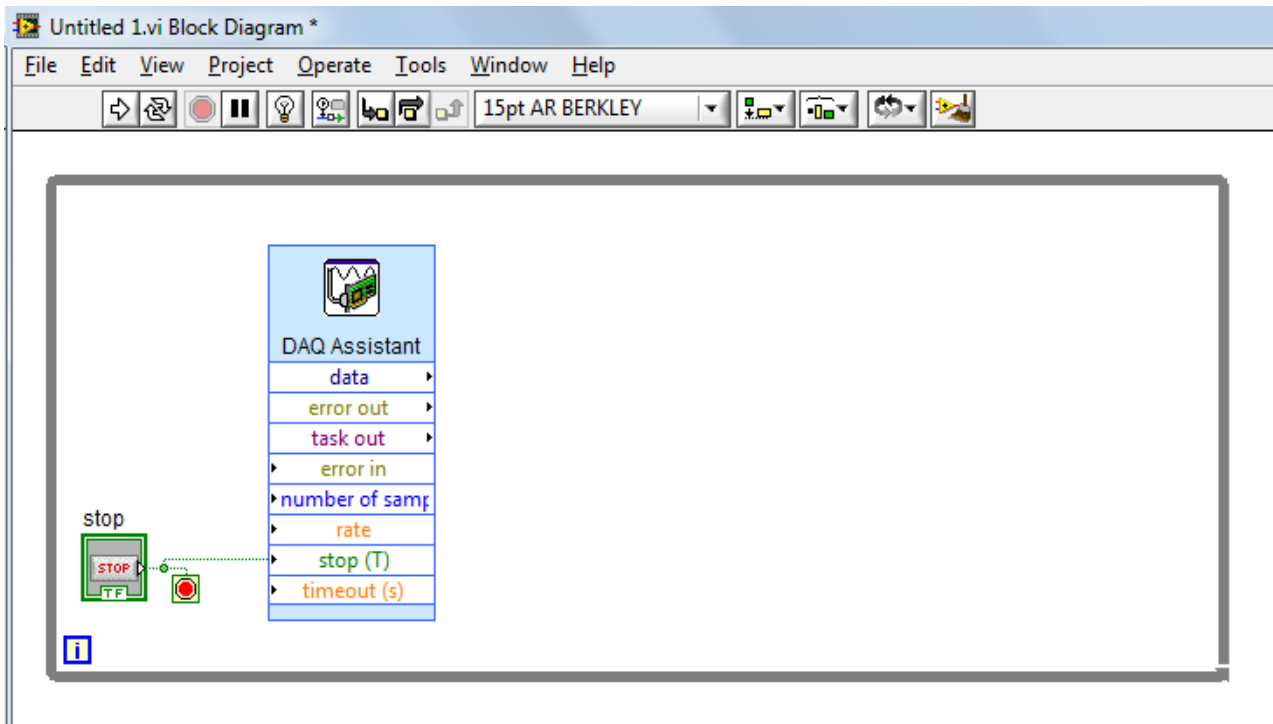


Рисунок 3.5 – внутренний алгоритм программы на данном этапе

д) Настроить блок вывода сигналов микрофонов. Для этого открыть основное окно, **Front Panel**, войти в меню блоков, выбрать **Modern >> Graph >> Mixed Signal Graph**. Теперь требуется настроить **Mixed Signal Graph**. В основном окне **Front Panel** нажать правой кнопкой мыши на **Mixed Signal Graph** и в открывшемся контекстном меню выбрать **Add Plot Area** и растянуть этот блок. Соединить все как показано на рисунке 3.9

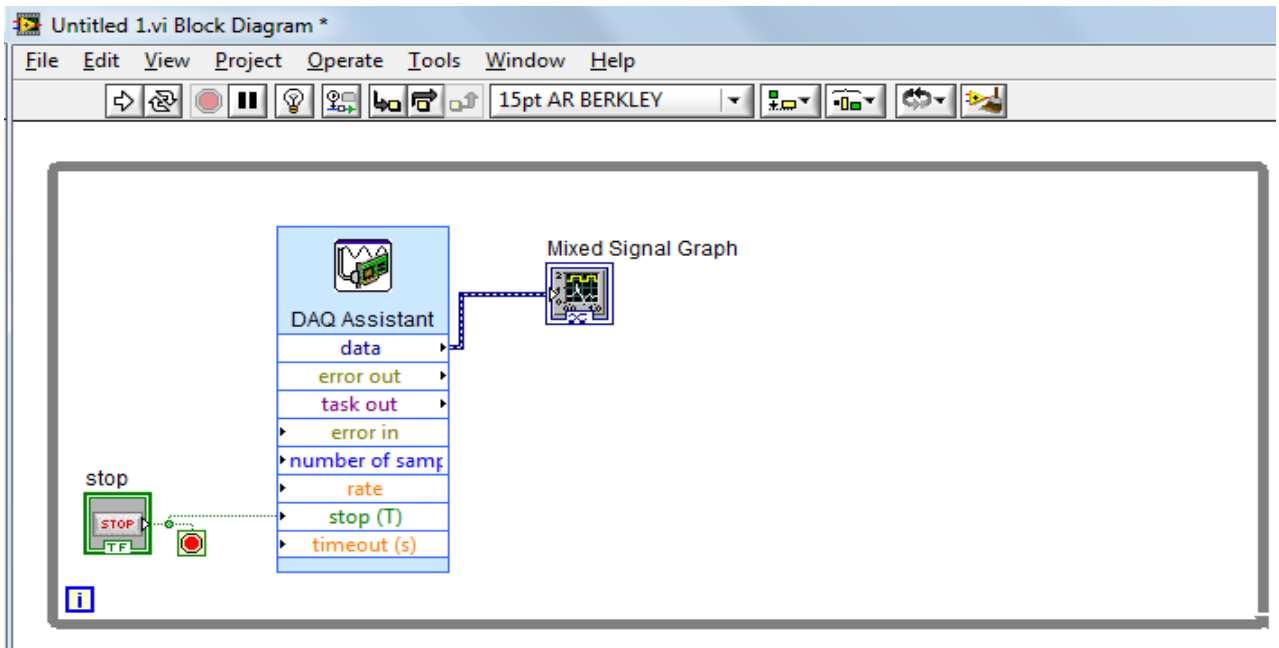


Рисунок 3.10 – Внутренний алгоритм программы на данном этапе

е) Теперь необходимо разделить сигнал и построить передаточную функцию. Для этого потребуется два блока. Открыть дополнительное окно Block Diagram, войти в меню блоков, выбрать **Express >> Sig Manip >> Split Signals**. Данный блок разделяет сигналы в той последовательности, в которой они были введены в блок **DAQ Assistant**.

Войти в меню блоков, выбрать **Addons >> Sound and Vibration >> S&V Express Measurements >> Frequency – Domain Measurements >> Frequency Responcy**.

Настроить блок **Frequency Responcy**. Для этого двойным щелчком мыши открыть меню настройки, вкладку **Configuration** и в графе **Magnitude scale** выбирать **Linear**, открыть вкладку **Input/Output** и поставить галочку на **Magnitude and Phase** и **Real and Imaginary**. Соединить все как показано на рисунке 3.11.

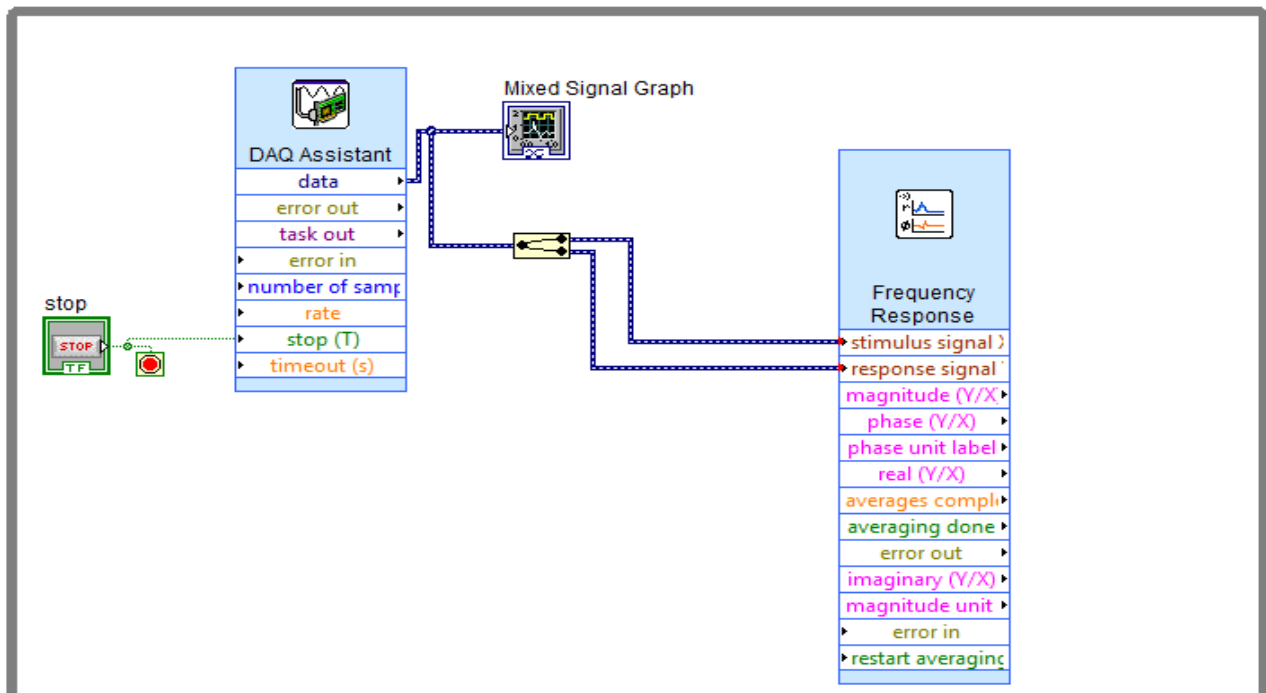


Рисунок 3.11 – Внутренний алгоритм программы на данном этапе

ж) Передаточная функция имеет вещественную и мнимую часть. Для дальнейшей работы потребуется объединить их. Для этого необходимо воспользоваться блоком **Programming >> Numeric >> Complex >> Re/Im To Complex**. Для реализации математического алгоритма выбрать блок **Programming >> Cluster, Class, & Variant >> Unbundle**. Соединить все, как показано на рисунке 3.12.

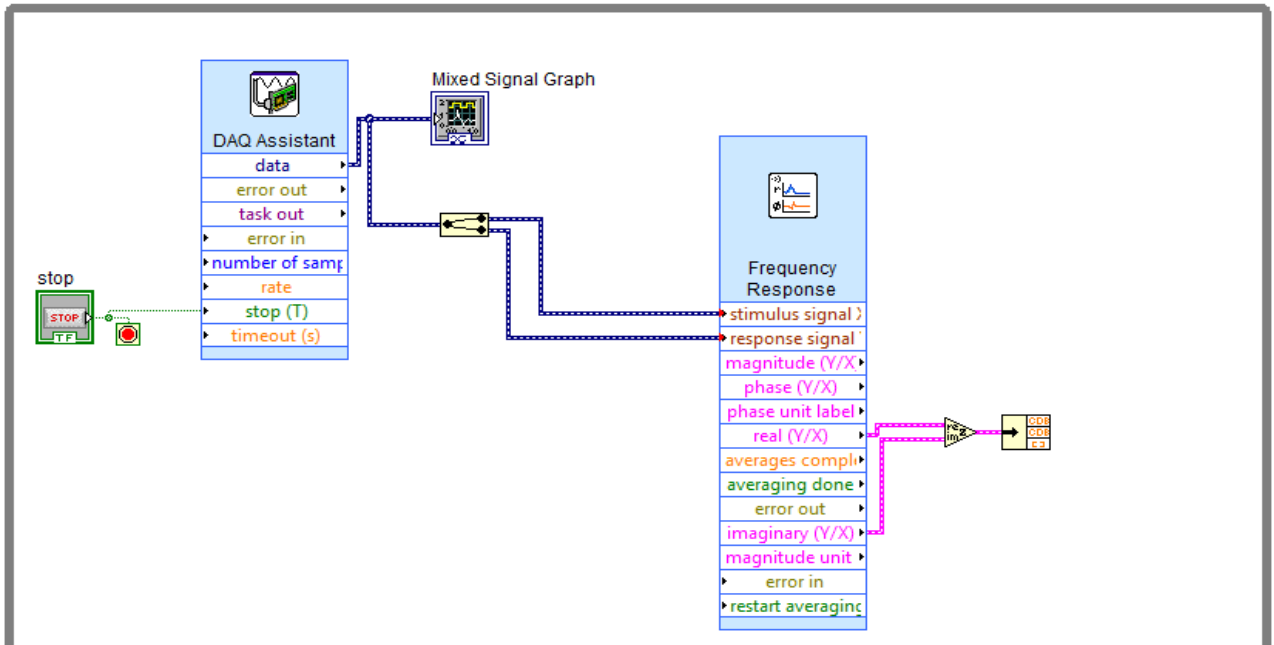


Рисунок 3.12 – Внутренний алгоритм программы на данном этапе

3) Теперь необходимо выполнить математическую обработку. Выполнить следующие операции **Function >> Mathematics >> Scripts & Formulas >> MathScript** (данный блок необходимо растянуть нажатой левой клавишей как на рисунке 3.13). Нажатием правой клавишей мышки на **MathScript** в открывшемся контекстном меню выбрать **Add Input**, добавить 5 входов, каждый из входов называем **f0, df, m, S, L**. Также добавить 5 выходов (**Add Output**) **f, k, ex1, ex2, ex3** (см. рисунок 3.13). Внутри **MathScript** прописать часть формулы (см. рисунок 3.13). К входу **s** задать константу для этого подвести курсор мышки к **s** нажать правую кнопку мышки в открывшемся контекстном меню выбрать **create >> constant** и задаем константу 0,0288, то же самое проделать для **L** только задаем 0,0519 (см теорию выше).

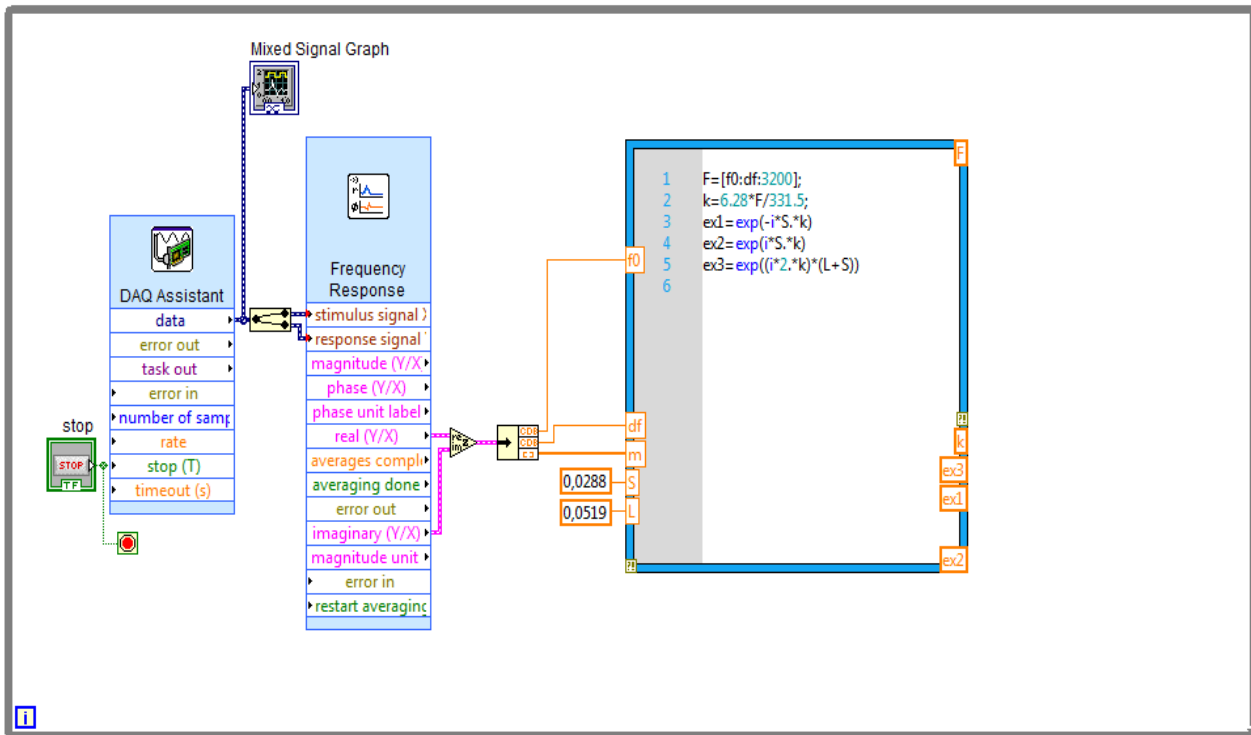


Рисунок 3.13 – Внутренний алгоритм программы на данном этапе

и) Для определения коэффициентов отражения и звукопоглощения необходимо дописать математический алгоритм, введя вспомогательные переменные:

$$ex1 = e^{-i \cdot S \cdot k}$$

$$ex2 = e^{i \cdot S \cdot k}$$

$$ex3 = e^{(i \cdot 2 \cdot k) \cdot (L + S)}$$

Используя блоки, выполняющие арифметические действия выполнить **Programming >> Numeric**.

к) Для получения коэффициента звукопоглощения α , перейти в основное окно программы и вставить **Function >> Express >> Graph Indicator >> XY Graph**. Установить график в удобное место и перейти в **block diagram** и соединить все как показано на рисунке 3.14.

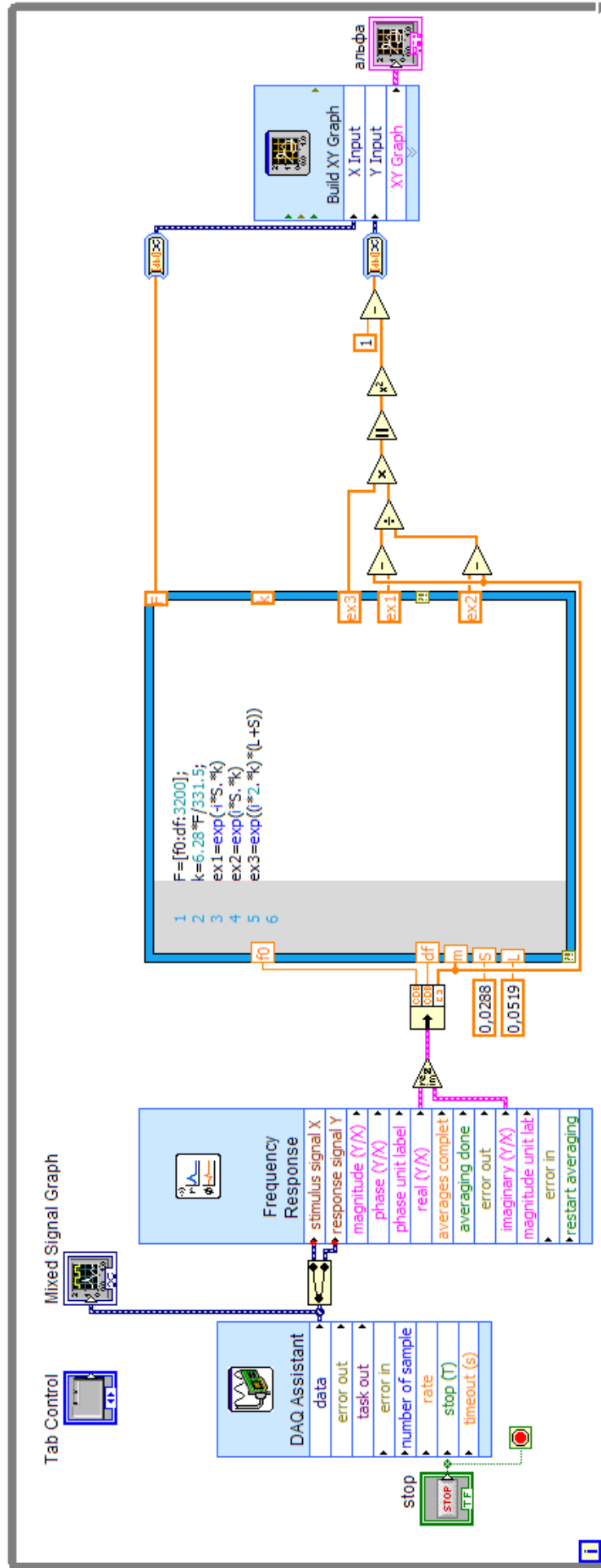


Рисунок 3.14 – Внутренний алгоритм программы

л) Для настройки внешнего вида программы перейти в основное окно **front panel**. Настроить график, на который выводится коэффициент α . Нажать на график правой кнопкой мыши и в открывшемся контекстном меню выбрать **X Scale >> AutoScale X**. То же самое сделать для оси ординат (это необходимо для исключения автомасштаба). На графике, по оси абсцисс прописать частотный диапазон 150 - 3000 Гц (рабочий диапазон трубы). По оси ординат от 0 до 1. Назвать оси и сам график.

п) Создание закладок позволяет облегчить поиск нужных спектров и графиков из общего числа.

Создать контур **Tab Control**. Открыть основное окно. **Front Panel**, зайти в список блоков, выбираем раздел **Modern >> Containers >> Tab Control**. В первую вкладку перенести **Mixed Signal Graph**, во вторую график с коэффициентом звукопоглощения. Если выполнен строго весь алгоритм, тогда получится программа следующего вида (см. рисунок 3.15).

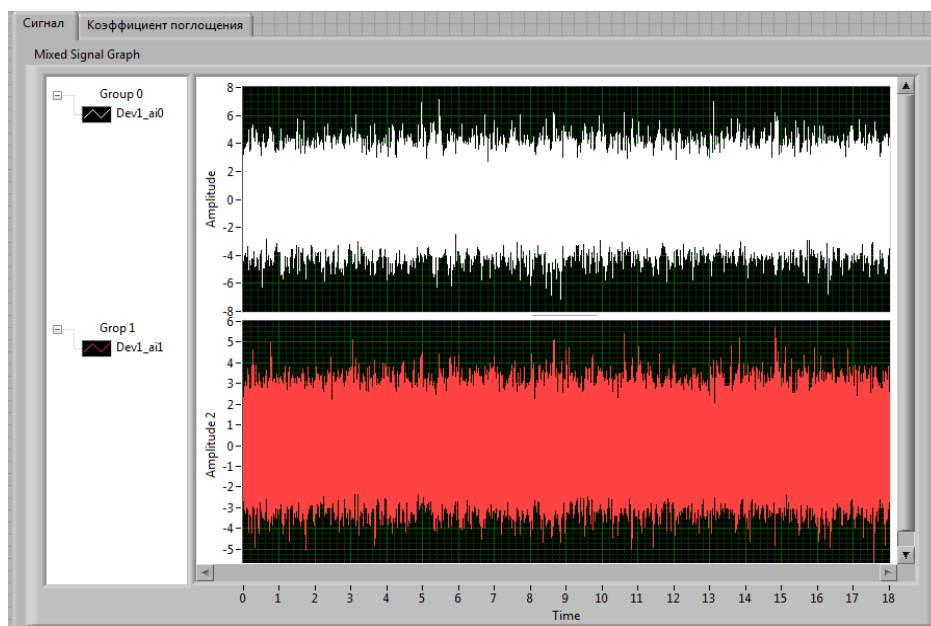


Рисунок 3.15 – Внешний вид программы

3.3 Порядок проведения измерений

Для экспериментального исследования акустических свойств материалов необходимо:

- Собрать установку (см. рисунок 2.1);
 - Вырезать образец для импедансной трубы;
 - Собрать программу в LabVIEW (см рисунок 3.12).
- а) Включить генератор розового шума (см. рисунок 4.1).

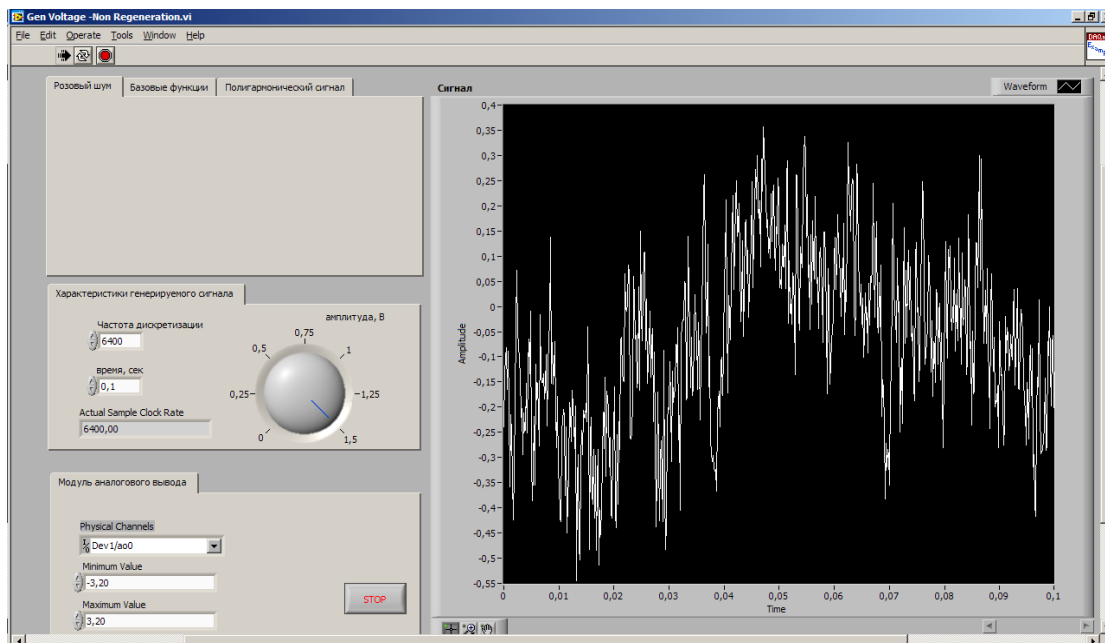




Рисунок 3.16 – Внешний вид генератора

Настройки генератора шума:

1. Указать частоту дискретизации 6400;
2. Амплитуда в положение 1,5;
3. В графе Physical channels выбрать Dev1/ao0;
4. Minimum value и Maximum value прописать -3,2 и 3,2 соответственно;
5. Нажать на кнопку .

б) Запустить программу нажав на кнопку  и проверить работоспособность. График коэффициента поглощения должен быть похож на рисунок 3.17.

Возможные неполадки:

- Не включен генератор розового шума (вытащить один микрофон и проверить, если звук, он похож на шипение телевизора);
- Не правильно установлены микрофоны (попробуйте поменять их местами);
- Не правильно собрана схема установки;
- Не правильные настройки блоков (проверить каждый блок);

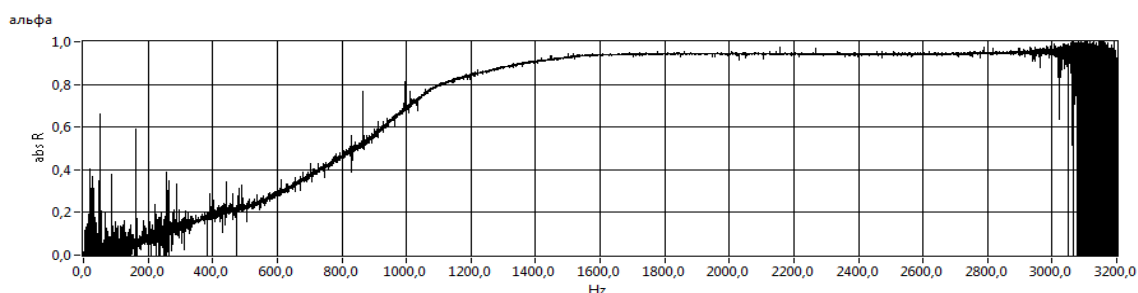


Рисунок 3.17 – Коэффициент поглощения

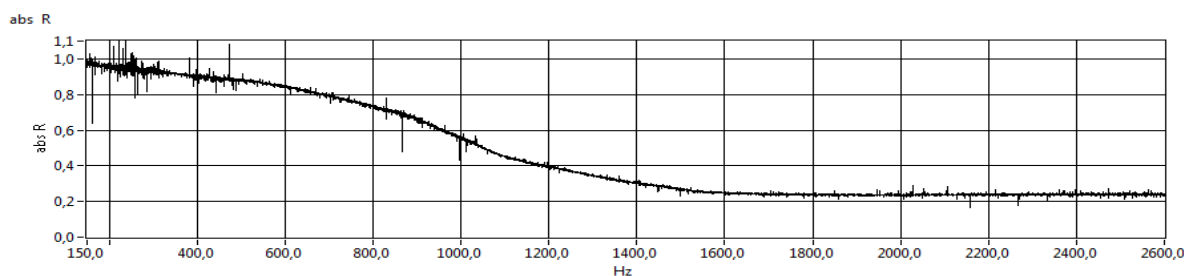


Рисунок 3.18 – Модуль коэффициента отражения

3.4. Определение неопределенности

Поскольку выяснить с абсолютной точностью истинное значение никакой величины невозможно, то невозможно и указать величину отклонения измеренного значения от истинного. Возможно, оценить величину этого отклонения, например, при помощи статистических методов. На практике вместо истинного значения используют действительное значение величины, то есть значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него. Понятие «погрешность» стало устаревать, вместо него было введено понятие «неопределённость измерений». ГОСТ Р 50.2.038-2004 допускает использовать термин погрешность для документов, использующихся в России [9].

Стандартную неопределенность, оцениваемую по типу, U_A вычисляют по формуле:

$$U_A = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

где n – число экспериментальных данных;

x_i – i -е экспериментальное данное, полученное при измерении; $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ –

среднее арифметическое экспериментальных данных, полученных при измерении.

Экспериментальные данные коэффициента звукопоглощения МР, полученные при измерении в импедансной трубе. Проведено десять измерений коэффициента звукопоглощения одного и того же образца МР ($\Pi=0,7$ $d_{\Pi}=0,2$ мм $h=10$ мм). После каждого измерения образец извлекался из установки и устанавливался обратно.

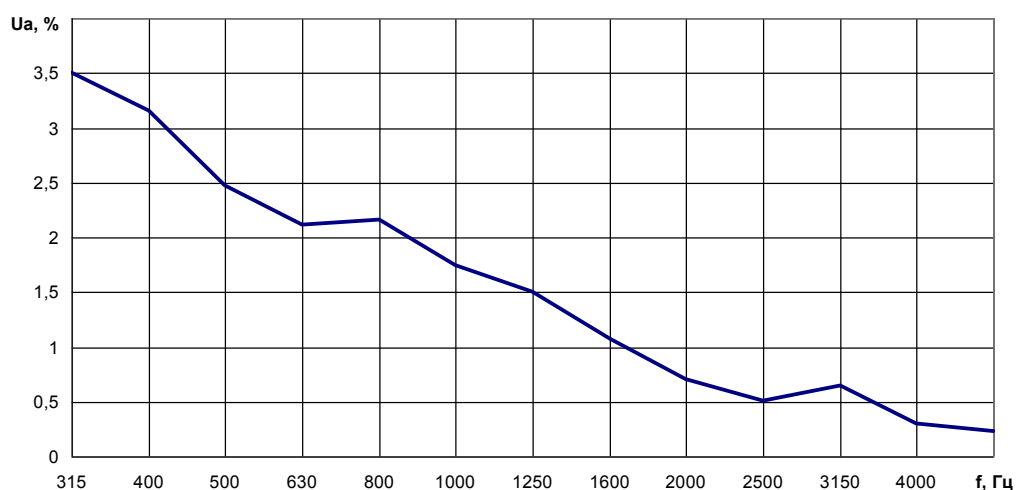


Рисунок 3.21– Неопределенности измерений в импедансной трубе

Таким образом, неопределенность измерений коэффициента звукопоглощения в импедансной трубе составляет на частотах до 1000 Гц от 2 до 3,5 %, на более высоких частотах неопределенность измерений составляет менее 2 %.

3.5 Сравнение экспериментальных и расчётных данных.

Обширный экспериментальный материал, является хорошей базой для оценки адекватности разработанных математических моделей, описание которых представлено во второй части.

Для сравнения результатов экспериментальных исследований с результатами, получаемыми по разработанной математической модели, были проведены расчеты частотных характеристик коэффициента звукопоглощения для образцов с исследованными параметрами. Сравнение расчетных и экспериментальных частотных характеристик коэффициента звукопоглощения в графическом виде представлено на рисунках 3.31 – 3.33.

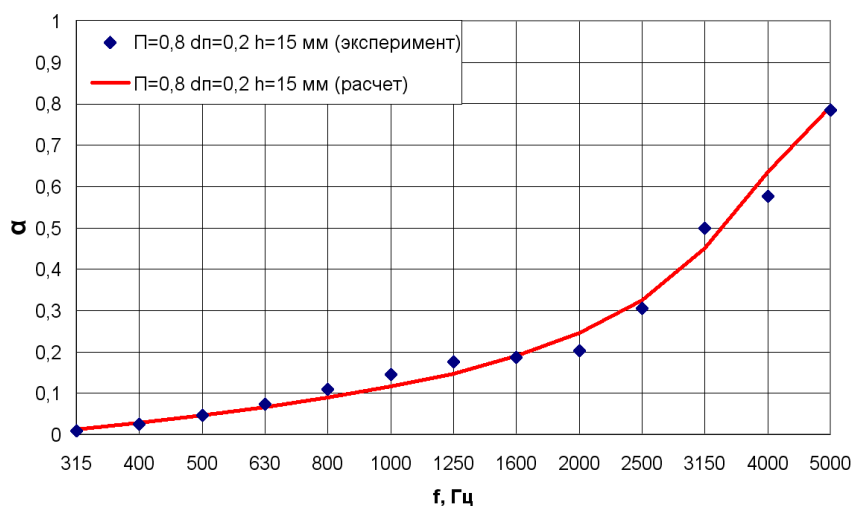


Рисунок 3.22 – Теоретические и экспериментальные значения частотной характеристики коэффициента звукопоглощения упругопористого материала МР ($\Pi = 0,8$; $d_{п} = 0,2$ мм $h = 15$ мм).

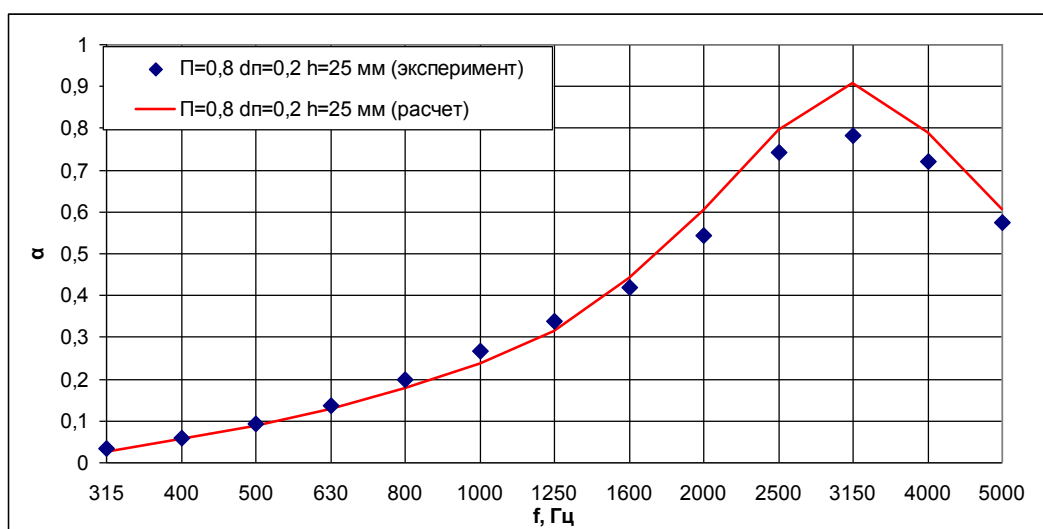


Рисунок 3.23 – Теоретические и экспериментальные значения частотной характеристики коэффициента звукопоглощения упругопористого материала МР ($\Pi = 0,8$; $d_{п} = 0,2$ мм; $h = 25$ мм).

Рассчитанные значения коэффициентов звукопоглощения упругопористого материала МР по разработанной математической модели (глава 2.2) дают хорошую сходимость с экспериментальными данными, полученными в импедансной трубе (рисунок 3.22 - 3.24).

3.6 Оформление результатов измерений и отчета

Результаты исследований записывают в протокол, который должен содержать следующие данные:

1. назначение и название исследуемого материала;
2. описание оборудования для измерений;
3. принципиальная схема установки;
4. основные отклонения от процедуры проведения измерений с указанием причин;
5. графики коэффициентов измеренный в импедансной трубе
6. дату испытаний;
7. Ф.И.О. и номер группы студента, проводившего испытания.

Контрольные вопросы

1. Что такое коэффициент отражения?
2. Что такое коэффициент поглощения?
3. Что такое передаточная функция?
4. Для чего проводят измерение коэффициентов отражения и коэффициента поглощения?
5. Какое оборудование используется при измерениях в импедансной трубе?
6. В чем заключается методика измерения в импедансной трубе?

Список использованных источников

- 1 Авиационная акустика [Текст]. В 2 ч. Ч. 1. Шум на местности дозвуковых пассажирских самолетов и вертолетов / А.Г. Мунин, В.Ф. Самохин, Р.А. Шипов [и др.]; под общ. ред. А.Г. Мунина. – М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.
- 2 Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 278 с.
- 3 Алиев, Т. М. Измерительная техника: Учеб. пособие для техн. Вузов [Текст]/ Т.М.Алиев, А. А. Тер-Хачатуров. – М.: Высш. шк., 1991. – 384 с.
- 4 Аэрогидромеханический шум в технике [Текст]. Пер. С. Л. Вишневого; Под ред. Р. Хиклинга. – М.: Мир, 1980. – 336 с.
- 5 Баумайстер, К. Дж. Расчет оптимизированных многосекционных акустических облицовок [Текст] / К. Дж. Баумайстер – М.: Ракетная техника и космонавтика, 1979. – № 11. – С. 41.
- 6 Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении 2-е изд., перераб. и допол. [Текст]/ С.В. Белов – М.: Metallurgy, 1981. – 247 с.
- 7 Белоусов, А. И. Исследование гидродинамических и фильтровальных характеристик пористого материала МР [Текст] / А.И. Белоусов, Е. А. Изжеуров, А. Д. Сетин // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов – Куйбышев: 1975. Вып 2. - С. 70-80.
- 8 Белоусов, А. И. Конструктивные методы снижения шума авиационных двигателей [Текст]: Учебное пособие./ А.И. Белоусов, И.С. Загузов – Куйбышев: КуАИ, 1982. – 96 с.
- 9 ГОСТ Р 50.2.038. – 2004 Оценивание погрешностей и неопределенности результата измерений [Текст] – Введ. 2004-10-27. – М.: Издательство стандартов, 2004. – 7 с.

- 10 ГОСТ Р ЕН 29053. – 2008 Материалы акустические. Методы определения сопротивления продуванию потоком воздуха [Текст] – Введ. 2008-03-13. – М.: Издательство стандартов, 2008. – 14 с.
- 11 Изжеуров Е.А. Исследование гидродинамических и фильтровальных характеристик упруго пористого материала МР для систем двигателей летательных аппаратов: дис. канд. техн. наук: 05.07.05: защищена 1975 г.: – Куйбышев, 1975. – 191 с.
- 12 Изжеуров Е.А. Формирование элементов конструкций гидродинамического тракта энергетических установок из упруго пористого материала МР [Текст]/ Е.А. Изжеуров.– М.: Машиностроение, 2001. – 284 с.
- 13 Карнаухов, А.П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов [Текст] / А.П. Карнаухов. – Новосибирск: Наука. Сиб. Предприятие РАН, 1999. – 470 с.
- 14 Коллинз, Р. Течение жидкостей через пористые материалы [Текст]/ Р. Коллинз – М.: Мир, 1964. 350 с.
- 15 Комплексное решение проблем виброакустики изделий машиностроения и аэрокосмической техники [Текст]// Е.В. Шахматов: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&CO.KG 2012. – 81 с.
- 16 Лейбензон, Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде [Текст]/ Л.С. Лейбензон - М.: Машиностроение, 1947. – 244 с.
- 17 Лопашев, Д.З. Методы измерения и нормирования шумовых характеристик [Текст] / Д.З. Лопашев, Г.Л. Осипов, Е.Н. Федосеева. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 232 с.
- 18 Мунин, А.Г. Аэродинамические источники шума [Текст] / А.Г. Мунин, В.М. Кузнецов, Е.А. Леонтьев. – М.: Машиностроение, 1981. – 248 с.
- 19 Сафин, А.И. Разработка математической модели акустических характеристик упругопористого материала «металлорезина» [Текст] /А.И. Сафин, А.А. Иголкин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. – Самара, 2012. – № 3 (2). – С. 69-74.

- 20 Финкельштейн, А.Б. Теория и практика получения пористых отливок из алюминиевых сплавов пропиткой [Текст]: дис... д-ра техн. наук: 06.16.04 / Финкельштейн Аркадий Борисович. – Екатеринбург, 2010. – 338 с.
- 21 Юдин, Е.Я. Борьба с шумом [Текст] / Е.Я. Юдин. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1964. – 702 с.
- 22 Allard, J.F. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials [Текст]/ Y.Champoux// J. Acoust. Soc. Am., vol. 91, 1992, pp. 3346-3353.
- 23 David A. Bies Engineering noise control [Текст] / A. Bies David, Colin H. Hansen – London and New York: Spon Press, 2009, 768 p.
- 24 Delany, M.A. Acoustic properties of fibrous absorbent materials [Текст]/ M.A. Delany, E.N. Bazley // Appl. Acoust. 3, 1970. 105-116.
- 25 Hydrodynamic noise dampener with metal rubber [электронный ресурс] / A.I. Safin, M.A. Ermilov, A.A. Igolkin [et al.] // The 21st International Congress on Sound and Vibration (ICSV 21): The international institute of Acoustics and Vibration July 13-15. – Beijing, China. – 2014.

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МР
(МЕТАЛЛОРЕЗИНЫ)

Методические указания

Составитель *Иголкин Александр Алексеевич*

Сафин Артур Ильгизарович

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 3,375.

Тираж 10 экз.

Самарский университет.

443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского университета.

443086 Самара, Московское шоссе, 34