

**Министерство образования и науки РФ**

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Казанский (Приволжский) Федеральный Университет»**

**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ  
КАФЕДРА РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

Направление: 03.03.03 «Радиофизика»

Профиль подготовки: Радиофизические методы по областям применения

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(Бакалаврская работа)**

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ РЕЗОНАТОРА ГЕЛЬМГОЛЬЦА НА  
ЕГО СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ**

Работа завершена:

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2016 г. \_\_\_\_\_ Мардегалямов М.М.

Работа допущена к защите:

Научный руководитель:

Старший преподаватель, к.т.н.

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2016 г. \_\_\_\_\_ Марфин Е.А.

Заведующий кафедрой,

д.ф.-м.н., профессор

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2016 г. \_\_\_\_\_ Овчинников М.Н.

**Казань – 2016**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Колебательные системы и процессы.....	5
1.1 Колебания.....	5
1.2 Возбуждение резонатора потоком воздуха.....	7
1.3 Струйный резонатор Гельмгольца.....	9
1.3.1 Струйный излучатель упругих волн на основе резонатора Гельмгольца.....	10
1.3.2 Представление струйного резонатора Гельмгольца при помощи метода электроакустических аналогий.....	14
2. Экспериментальная часть.....	20
2.1 Описание экспериментальной установки.....	20
2.2 Ход эксперимента.....	22
2.2.1 Исследование зависимости собственных частот СРГ при озвучивании камеры белым шумом.....	22
2.2.2 Исследование зависимости собственных частот СРГ от скорости потока струи воздуха.....	25
Заключение.....	27
Список литературы.....	28
Приложение А.....	30
Приложение Б.....	35

## ВВЕДЕНИЕ

В любых колебательных системах, предполагается наблюдение явления резонанса. Под этим явлением подразумевается резкое возрастание амплитуды собственных колебаний системы под действием вынуждающей силы. Необходимым условием возникновения резонанса является совпадение частоты собственных колебаний с частотой вынужденных колебаний.

С явлением резонанса приходится сталкиваться в самых разных ситуациях: при спектральном анализе сложных звуков, при создании узкополосных приемников звука, чувствительных к определенной частоте, излучателей колебаний и др. В ряде таких случаев используется акустический резонатор - устройство, обладающее одной или множеством собственных частот [1]. Такие колебательные системы могут представлять собой полости, каналы, камеры, системы объемных резонаторов, которые в сочетании могут образовывать сложные устройства, по своему действию аналогичные резонансным контурам, фильтрам и т.д. С их помощью можно выделять или подавлять определенные диапазоны частот, или же генерировать упругие волны. Также резонатор может обеспечивать повышение эффективности работы нагнетательных скважин в нефтедобывающей промышленности, в частности в области разработки месторождений [2].

Актуальность обусловлена исследованием собственных колебаний струйного резонатора Гельмгольца (СРГ) и влиянием геометрических особенностей резонатора и его элементов на собственные частоты. Это связано с тем, что в зависимости от конфигурации резонатора и при разных режимах работы, необходимые параметры и поправочные коэффициенты будут иметь разные значения. Суть настоящей работы заключается в исследовании этих конфигураций, режимов работы резонатора и нахождении дискретных частот собственных колебаний.

Целью работы является исследование влияния режима работы и геометрических параметров струйного резонатора Гельмгольца на его собственные частоты.

Для достижения поставленной цели необходимо решения таких задач как:

- обзор научной литературы по данному вопросу;
- создание экспериментальной установки и разработка методики проведения исследования;
- проведение экспериментальных исследований и анализ полученных результатов.

# 1. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРОЦЕССЫ

## 1.1 Колебания

Под колебательным процессом понимается процесс перемещения твердых, жидких или газообразных тел, при котором они совершают движения (колебания), полностью или частично повторяющиеся во времени [3].

Звук распространен в виде переменного возмущения упругой среды, т.е. в виде звуковых волн. Звуковыми колебаниями называют колебательные движения частиц среды под действием этого возмущения. Пространство, в котором происходит распространение этих волн, называют звуковым полем. Если источник возмущения известен, то пространство, в котором могут быть обнаружены звуковые колебания, создаваемые этим источником, называют звуковым полем данного источника звука. Звуковые колебания являются частным случаем механических колебаний.

Звуковые колебания в жидкой и газообразной средах являются продольными колебаниями, т.е. частицы среды колеблются вдоль линии распространения волны. В твердых телах, кроме продольных колебаний, имеют место и поперечные колебания, т.е. такие, в которых частицы среды колеблются в направлении, перпендикулярном линии распространения волны.

Направление распространения звуковых волн называют звуковым лучом, а поверхность, соединяющую все смежные точки поля с одинаковой фазой колебания частиц среды, называют фронтом волны. Фронт волны перпендикулярен звуковому лучу.

Звуковые волны распространяются с определенной скоростью, называемой скоростью звука. В разных средах и телах скорость звука может быть различной.

В газообразных средах скорость звука зависит от плотности среды и статического атмосферного давления:

$$c = \sqrt{\gamma * \frac{Pat}{\rho}}, \quad (1.1)$$

где  $\gamma = C_p / C_v$  - коэффициент адиабаты;  $C_p$  и  $C_v$  – теплоемкость среды при постоянном давлении и объеме соответственно[4].

Резонатор - колебательная система, в которой происходит накопление энергии за счет резонанса с вынуждающей силой. Акустический резонатор-это устройство, предназначенное для получения резонанса акустических колебаний в среде, заполняющей устройство. Резонатор Гельмгольца (рис.1.1) – акустический прибор, представляющий собой сосуд сферической формы с открытой горловиной. Для данного прибора характерно явление резонанса. Оно подразумевает возрастание амплитуды колебаний воздуха в полости, ярким примером которого служит гудение пустой бутылки от потока воздуха в направлении к ее горлышку.

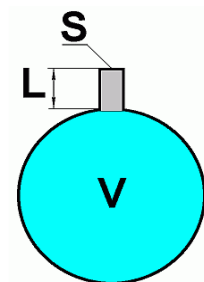


Рис.1.1. Схема резонатора Гельмгольца

Формула для определения частоты собственных колебаний такого резонатора имеет вид:

$$F = \frac{c_0}{2\pi} * \sqrt{\frac{S}{V * L}} \quad (1.2)$$

где  $F$  - частота, Гц;  $C_0$  - скорость звука в воздухе (340 м/с );  $S$  – сечение отверстия,  $м^2$ ;  $V$  – объем резонатора,  $м^3$ ;  $L$  – длина отверстия, м.

Другой вариант резонатора – органная труба (рис.1.2). Стоячие волны возможны в таком резонаторе лишь в тех случаях, когда на длине волны укладывается нечетное число четвертей длин волн.

Для случая четвертьволнового и полуволнового резонатора расчетные формулы частот собственных колебаний будут иметь вид:

$$F_{\frac{1}{4}} = \frac{c_0}{4L} * (2p - 1) \quad (1.3)$$

$$F_{\frac{1}{2}} = \frac{p * c}{2L} \quad (1.4)$$

где  $p = 1, 2, 3 \dots$  – целое число.



Рис.1.2. Схема четвертьволнового резонатора

В таком случае, резонатор будет вести себя как некоторая система, которая на различных частотах будет иметь различные моды. Резонансных частот много, однако, наиболее выражена первая мода колебаний. Но в данной работе мы струйно возбуждаемый резонатор Гельмгольца с двумя горлами.

## 1.2 Возбуждение резонатора потоком воздуха

Возникновение звука при обтекании акустических резонаторов потоком воздуха представляет собой хорошо известное явление и с давних пор находит себе применение в духовых музыкальных инструментах, свистках и тому

подобных устройствах. В войне это явление было использовано противником в так называемых воющих бомбах, рассчитанных на усиление психологического эффекта. Оно находит себе и другие, более целесообразные применения в военном деле. В некоторых случаях приходится бороться с этим явлением как с вредным.

При звуковых измерениях в условиях ветра, ветер может приводить к возбуждению полостей, имеющихся при случае в измерительных устройствах, и тем самым являться источником существенной помехи(например в звукоприемнике, составленном для увеличения направленности из системы трубок).

Стрелковым недавно было исследовано интересное явление возбуждения открытых аэродинамических труб, могущее вести к катастрофическим последствиям. Несмотря на то, что явление возбуждения резонатора потоком ветра известно уже давно, все же не существует полной ясности относительно механизма такого возбуждения.

Нам представлялось первостепенным то обстоятельство, что периодические пульсации давления, приводящие к возникновению звука, возникают уже и в тех случаях, когда обтекаемое воздухом тело вовсе не является резонатором. Эти пульсации вызываются вихреобразованием в области неустойчивости потока, на границе раздела струи и „тени“, и, в частности, известны под названием „вихревого звука“, или „звука Струхали“. Частоты этих пульсаций определяются исключительно формой тела, его расположением, размерами и скоростью потока:

$$f = \chi \frac{u}{d} \quad (1.5)$$

где  $\chi$  – безразмерный коэффициент (число Струхали), определяемый геометрией потока;  $u$  – скорость потока;  $d$  – характерный размер тела [5].

Естественно было считать, что эти пульсации давления и являются первопричиной возбуждения резонатора. И в самом деле, нам удалось показать, что возбуждение резонатора происходит тогда, когда частота вихрей совпадает с одной из собственных частот резонатора. Вихри, однако, не представляют собой жесткой системы, и поэтому было бы слишком примитивно думать, что мы имеем здесь дело с обычным явлением резонанса.

Колебания резонатора могут сами влиять на колебания вихрей так, что можно предполагать наличие обратной связи, осуществляющейся вблизи резонанса.

В упомянутом выше случае возбуждения открытой аэродинамической трубы, исследованном Стрелковым [6], также оказалось, что колебания возбуждаются лишь при условии, что частоты вихрей совпадают с частотами трубы. Однако остался открытым вопрос о том, свойственны ли эти частоты вихрям самим по себе или они целиком определяются колебаниями трубы.

### 1.3 Струйный резонатор Гельмгольца

Устройство, названное в работе [7] струйным резонатором Гельмгольца (СРГ), представляет собой камеру с жесткими стенками и двумя круглыми отверстиями, расположенными соосно на двух противоположных стенках, проходя сквозь эти отверстия, струя может протекать через камеру. При некоторых скоростях струи возникающие в ней неустойчивости взаимодействуют с резонатором Гельмгольца и вызывают очень мощные колебания давления в камере, с частотой, несколько превышающей собственную акустическую частоту камеры. Амплитуда этих колебаний давления может достигать величины, превышающей в 5,6 раза скоростной напор струи. Одновременно на той же частоте пульсирует вытекающий поток с амплитудой пульсаций, достигающей 60% скорости истечения струи, и излучается громкий звук. Камера вместе со своими отверстиями работает как резонатор Гельмгольца, реагируя на поле давления в струе и вызывая

колебания давления в камере на частоте, близкой к собственной акустической частоте камеры.

### 1.3.1 Струйный излучатель упругих волн на основе резонатора Гельмгольца.

Главным предпочтением данной работы было улучшение излучателей, которые основываются на использовании генераторов колебаний давления. В свою очередь эти генераторы колебаний давления базируются на основе резонатора Гельмгольца. Его выгодное отличие заключается в отсутствии подвижных элементов конструкции. Это осуществляет обеспечение большой надежности продолжительной работы всей конструкции в целом.

Струйный излучатель колебаний давления на основе резонатора Гельмгольца [9,10,11] представляет собой цилиндрическую камеру с жесткими стенками и двумя круглыми отверстиями, расположенными соосно на двух противоположных торцах камеры (рис. 1.3). Газ поступает в осесимметричную полость через входное сопло  $d_1$  и истекает в окружающую среду через выходное сопло  $d_2$ .

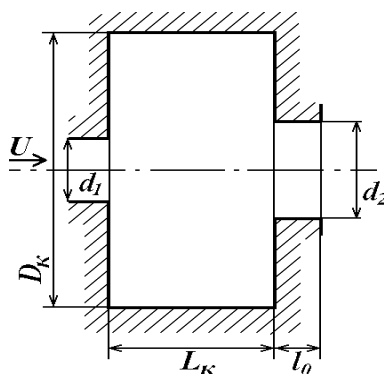


Рис. 1.3. Функциональная схема струйного излучателя на основе резонатора Гельмгольца.

Главной задачей в процессе разработки требуемого излучателя основой для обеспечения заданного режима работы устройства является определение геометрических параметров. Характерными геометрическими параметрами

излучателя являются:  $D_k$  – диаметр резонансной камеры,  $L_k$  – длина резонансной камеры,  $d_1$  – диаметр проходного сечения входного сопла,  $d_2$  – диаметр проходного сечения выходного сопла,  $l_o$  – длина выходного сопла. Входное сопло может отличаться формой проточного тракта.

При наблюдении истечения газа через устройство, решении данной задачи является невозможным без всесторонних исследований физических явлений. К ним относятся: возбуждения тона отверстий; образование вихревых турбулентных структур, усиление колебаний при резонансе и др.

В работах [9,10,11] опубликованы данные экспериментального исследования в процессе которого возбуждался резонатор Гельмгольца, при помощи протекающей через него струей жидкости (воды, воздуха). Обобщая их выводы можно предположить, что механизм генерации заключается в следующем. Струя из сопла на входе (диаметром  $d_1$ ) движется через осесимметричную полость камеры диаметром  $D_k$  и затем выходит в окружающую среду через выходное сопло ( $d_2$ ). Диаметр струи много меньше диаметра полости и, вследствие этого, скорость в струе много выше, чем в полости. Это ведет к сильным сдвиговым смещениям на границе раздела между двумя потоками. Вследствие вязкости сред на границе происходит обмен количеством движения между двумя потоками. Результатом сдвигового течения является образование вихревых колец. Соударение этих упорядоченных осесимметричных возмущений с кромкой выходного сопла ( $d_2$ ) вызывает периодические импульсы давления. Данные импульсы селективно усиленные в результате резонанса в камере Гельмгольца, распространяются вверх по потоку к зоне отрыва. При удачном выборе длины камеры излучателя возмущение достигает зоны входа струи в камеру в момент генерации следующего вихря и цикл самовозбуждения повторяется.

Механизм взаимосвязи аналогичен другим видам взаимодействия струи с преградами, например, случаю натекания на клиновидное тело плоской струей, хороший обзор которого сделан в работах [12,13]; случаю натекания осесимметричной струи на отверстие [14-16] и случаю тангенциального

течения над плоскими выемками (рис. 1.4).

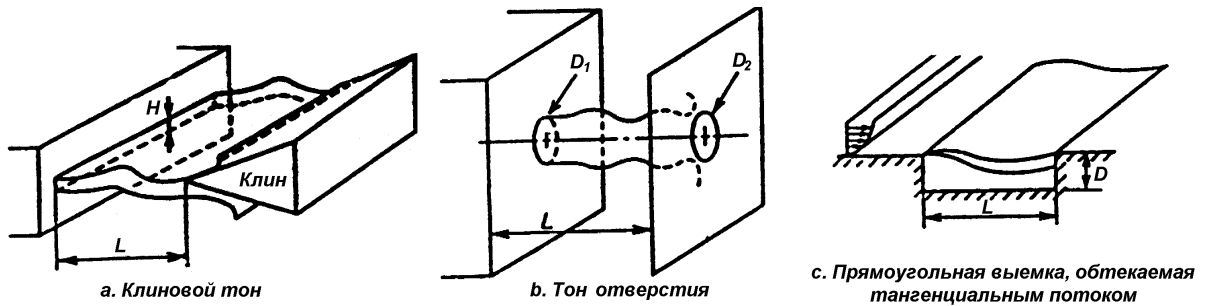


Рис. 1.4. Конфигурации-аналоги, в которых возбуждается слышимый тон при взаимодействии потока с твердой преградой.

Оказывается действительным, что в основе многочисленных газоструйных излучателей звука лежит явление звукообразования, возникающее при натекании струи газа на клин. Большая часть из них относится к системам клиновый тон – резонатор, меньшая – клиновый тон – отражатель. Хотя этим системам и чисто клиновому тону посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ, здесь еще много нерешенных вопросов.

Известно, что частота клинового тона увеличивается с увеличением скорости струи и уменьшением расстояния между клином и соплом. Спектр клинового тона – линейный. Рядом исследователей получены различные эмпирические формулы для определения частоты клинового тона:

$$f=0,466 \cdot j \cdot (v-40) \cdot (h^{-1}-0,07), \quad (1.7)$$

где  $j= 1; 2,3; 3,8; 5,4$ ;  $h$  — расстояние от сопла до клина;  $v$  — скорость струи;

$$f=n \cdot v/(2 \cdot h), \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (1.8)$$

$$f=(N+1/4) \cdot v/h, \quad (1.9)$$

где  $n$  и  $N$  – целые числа, соответствующие номеру стадии по терминологии

Брауна [12].

Проведенные авторами работы [12] исследования показали, что каждая из этих формул является лишь частным случаем более общей формулы:

$$f=i \cdot k \cdot v_0/(4 \cdot h), \quad (1.10)$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots$ ;  $k = 0,765 \div 0,770$  – эмпирическая константа;  $v_0$  — средняя по сечению скорость струи на выходе из сопла;  $h$  — расстояние от сопла до клина.

Возможным недостатком может является то, что в этих формулах отсутствует зависимость частоты возбуждаемых колебаний от толщины струи.

В работе [10] приведены результаты исследования струйно-возбуждаемого резонатора Гельмгольца, предназначенного для разрушения горных пород за счет эффекта кавитации, возникающего при истечении струи жидкости из резонатора. Определены оптимальные диапазоны геометрических параметров, обеспечивающие наиболее эффективные характеристики разрушения горной породы. В этой работе также представлена математическая модель процесса самовозбуждения резонатора, основанная на теории нестационарного течения. Приведены результаты исследования гидроакустических характеристик. Основное предназначение такого устройства – использование в качестве струйного бурильного инструмента.

В статье [9] и в патенте [17] Morel представил всестороннюю информацию об осцилляторах Гельмгольца, возбуждаемых воздушной струей, и показал, что для эффективной генерации колебаний необходимо выдержать соотношение геометрических параметров (рис. 1.5) в диапазонах:  $D_2/D_1=1 \div 2,1$ ;  $V/D_1^3=14 \div 350$ ;  $L/D_1=0,5 \div 7$ ;  $L_1/D_1=0 \div 2$ ;  $D_f/D_1=2,5 \div 10$ ;  $L_2/D_1=0 \div 7$ ;  $D_t/D_1=4 \div 8$ . Эти данные основаны на экспериментальных исследованиях и, к сожалению, не содержат информацию об оптимальных значениях геометрических характеристик устройства и условиях автономности.

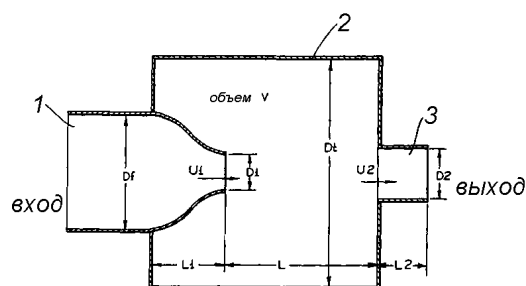


Рис. 1.5. Схема струйного излучателя [17].

В работе [12] описаны эксперименты с использованием воздушных струй, истекающих в газовую среду. Эти эксперименты показали, что когда скорость истекающей струи  $V$  осциллирует относительно ее среднего значения с амплитудами равными только нескольким процентам среднего значения, структура струи резко изменяется, если частота колебаний  $f$  составляет 0,2-1,2 отношения скорости струи  $V$  к диаметру  $D$ . Показано, что наиболее резкие изменения структуры струи происходят при  $Sh=f \cdot D/V = 0,3$  и 0,6. Сдвиговая зона, окружающая струю, явно переходит от зоны с сильно некоррелированными мелкомасштабными вихрями к серии дискретных вихрей, смещающихся вниз по потоку по периферии струи со скоростью примерно 0,7 от выходной скорости струи. По наблюдениям, эта хорошо определенная структура воздушной струи разрушается на расстоянии нескольких диаметров струи, преобразуясь в турбулентное течение.

Большой обзор работ, посвященных турбулентным течениям и исследованиям структуры струйных турбулентных течений, представлен в работах [22,23]. В работах [24,25] достаточно подробно рассмотрены вихревые течения, динамика вихрей и их теория. В них исследованы различные аспекты движения вихрей, их структуры, энергетические характеристики.

### 1.3.2 Представление струйного резонатора Гельмгольца при помощи метода электроакустических аналогий

Механизм генерации колебаний давления излучателем на основе резонатора Гельмгольца основан на резонансном усилении пульсаций давления

в потоке жидкости (газа), проходящем через излучатель. Частота генерируемых колебаний зависит от скорости струи и при определенном значении расхода жидкости совпадает с частотой собственных колебаний резонатора. С точки зрения эффективности его применения важно, что бы режим работы устройства был резонансным. Для чего необходимо знание частоты собственных колебаний излучателя [26].

Наблюдавшийся в настоящей работе механизм в связи с наличием полости СРГ отличается от теоретической модели, предложенной для клинового тона и тона отверстия из-за наличия замкнутого (резонирующего) объема внутри камеры. Предполагается следующая последовательность событий (рис.1.6):

1) Течение в струе содержит низкочастотную упорядоченную осесимметричную переменную составляющую (и периодические колебания объемного расхода). Когда эта составляющая попадает в выходное отверстие и струя встречает различное сопротивление в выходной плоскости осциллятора, внутри камеры возникают периодические импульсы давления.

2) Эти импульсы, селективно усиленные механизмом резонанса Гельмгольца, устанавливают в камере пульсирующее поле давления.

3) Пульсирующее поле давления вызывает пульсации расхода на входе в камеру, что приводит к эффективному усилению колебаний струи на частоте упорядоченной составляющей.

4) Вязкий слой смещения струи (расширение струи от выхода ее из входного сопла, до начала столкновения с выходным соплом) откликается на усиление колебаний струи в диапазоне своих собственных акустических частот и усиливает их. В результате этого упорядоченное движение внутри струи усиливается, возникают вихревые кольца, и контур замыкается.

События в этой последовательности вступают в резонанс друг с другом только в том случае, когда между их фазами поддерживается определенное соотношение.

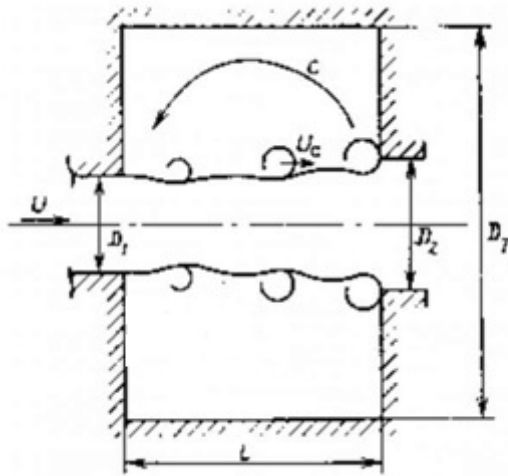


Рис. 1.6. Механизм связи в возбуждаемом струей резонаторе Гельмгольца

*Режим резонансных колебаний.* Струйный излучатель состоит из резонансной камеры, входного и выходного сопел. Площади проходного сечения сопел составляют  $S_1$  и  $S_2$  соответственно. Объем резонансной камеры равен:

$$V = \pi \cdot D_k^2 \cdot L_k / 4, \quad (1.11)$$

где  $D_k$  – внутренний диаметр камеры,  $L_k$  – ее длина.

Используемый способ расчета частоты собственных колебаний излучателя основан на методе электроакустических аналогий [18,8]. Согласно этому методу аналогом (перепада) давления на участке трубопровода считают падение напряжения на соответствующем участке фильтра, аналогом тока в той же точке является объемная скорость. Сужение трубопровода эквивалентно индуктивности, а расширение – емкости [8]. Поскольку выходной конец сужения открывается в свободное пространство, то реакция излучения на открытом конце выражается в схеме электроакустической аналогии в виде активного сопротивления  $R$ , которое шунтирует выходной конец электрической схемы [18,8].

Акустическая схема излучателя и эквивалентная ей электрическая схема представлена на рис. 1.7. Электрическая схема представляет собой последовательный колебательный контур с двумя катушками индуктивности. Входному соплу соответствует индуктивность  $L_1$ , резонансной камере соответствует емкость  $C$  и выходному соплу – индуктивность  $L_2$ .

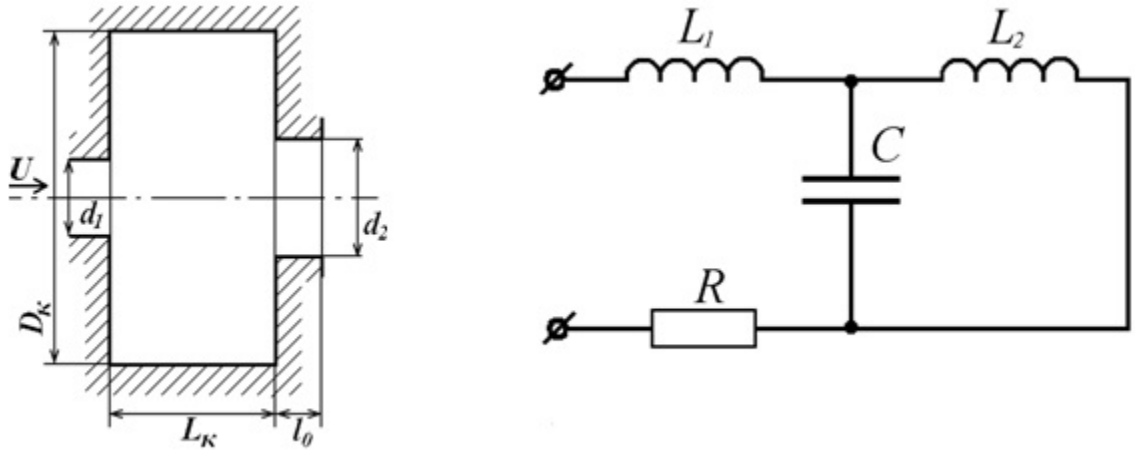


Рис.1.7. Схема излучателя на основе резонатора Гельмгольца и его эквивалентная электрическая схема.

Параметры индуктивностей, емкости и сопротивления в этой схеме выражаются в виде зависимостей:

$$L_1 = \frac{\rho \cdot l_{1э}^2}{S_1}, L_2 = \frac{\rho \cdot l_{2э}^2}{S_2}, C = \frac{V}{\rho \cdot c_0^2}, R = \frac{\rho \cdot \omega^2}{2\pi \cdot c_0} \quad (1.12)$$

где  $\rho$  – плотность среды,  $c_0$  – скорость звука в среде,  $l_{1э}$ ,  $l_{2э}$  – эффективная длина входного и выходного сопла.

Для сопел используется эффективная длина, потому что в колебательном движении участвует не только жидкость внутри сужения сопла, но и часть жидкости вблизи сужения. Связана она с физической длиной соотношением [8]:

$$l_{13}=l_1+0,25\cdot\pi\cdot d_1, l_{23}=l_2+0,25\cdot\pi\cdot d_2 \quad (1.13)$$

Отверстия являются составной частью резонаторных элементов глушителей шума. При прохождении звуковой волной отверстия происходит частичный переход поля этой волны в поле быстро затухающих неоднородных волн в окрестности отверстия. Формально это обстоятельство учитывается в терминах присоединенной длины отверстия [19]. Релей показал, что для отверстия в бесконечной перегородке присоединенная длина (концевая поправка) отверстия с одной стороны перегородки  $l_a$  пропорциональна радиусу отверстия  $a$ , причем имеет место неравенство:

$$\frac{\pi}{4}a < l_a < \frac{8}{3\pi}a, \quad (1.14)$$

Частоту собственных колебаний излучателя найдем как резонансную частоту колебательного контура. Условие резонанса – равенство нулю мнимой части комплексного сопротивления электрической схемы.

Комплексное сопротивление схемы этого контура равно:

$$Z = Z_{L_1} + \frac{Z_C Z_{L_2}}{Z_C + Z_{L_2}} + R \quad (1.15)$$

Согласно теории электрических цепей [20] комплексное сопротивление индуктивности  $L$  равно  $Z_L=j\omega L$ , а комплексное сопротивление емкости  $C$  равно  $Z_C=(j\omega C)^{-1}$ . Таким образом, уравнение (1.15) может быть представлено в виде

$$Z = j\omega L_1 + \frac{L_2 / C}{j\omega L_2 + (j\omega C)^{-1}} + R \quad (1.16)$$

Приравняв мнимую часть уравнения (1.16) найдем резонансную частоту

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C} \left( \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right)} \quad (1.17)$$

В результате подстановки в выражение (1.17) значений индуктивности и емкости согласно (1.12) и учитывая, что  $\omega=2\pi f$ , получаем формулу, в которой значение частоты собственных колебаний излучателя на основе резонатора Гельмгольца выражено через его геометрические параметры:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{V} \left( \frac{S_1}{l_{1_3}} + \frac{S_2}{l_{2_3}} \right)} \quad (1.18)$$

или

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi D} \sqrt{\frac{1}{L} \left( \frac{d_1^2}{l_1 + 0,25\pi d_1} + \frac{d_2^2}{l_2 + 0,25\pi d_2} \right)} \quad (1.19)$$

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Описание экспериментальной установки

Для исследования струйного излучателя на основе резонатора Гельмгольца на резонансные частоты собственных колебаний была использована экспериментальная установка, изображена на рис 2.1.

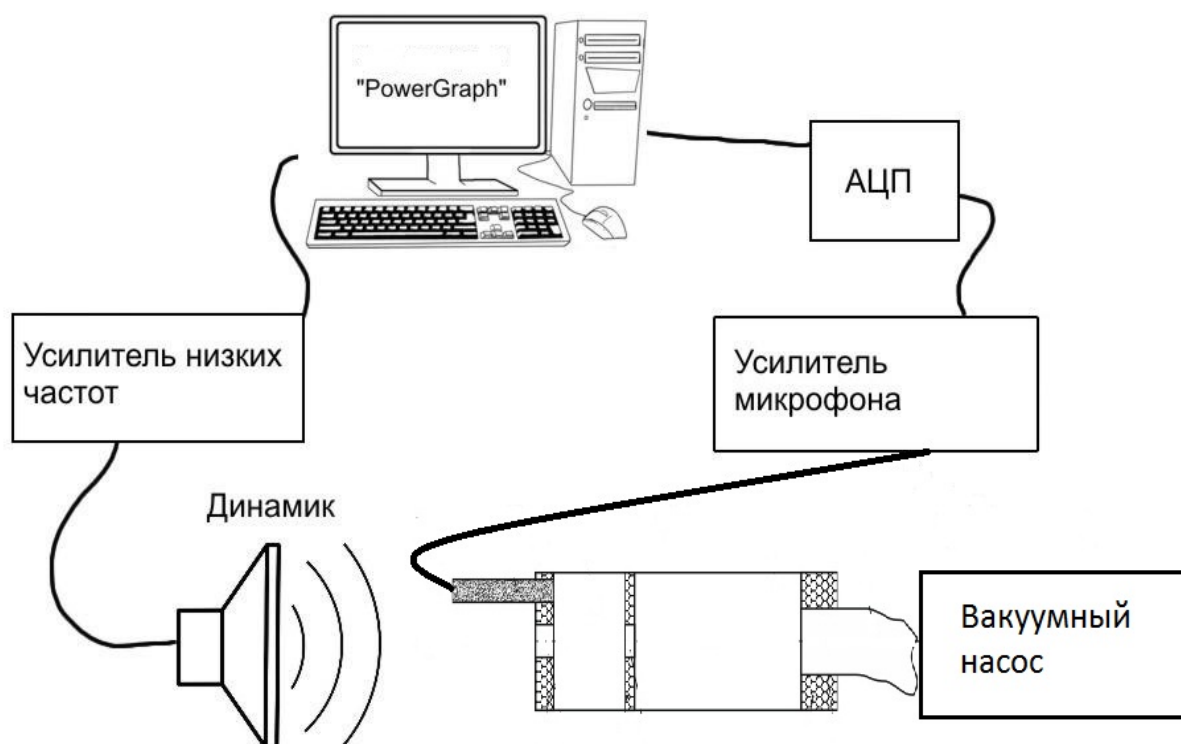
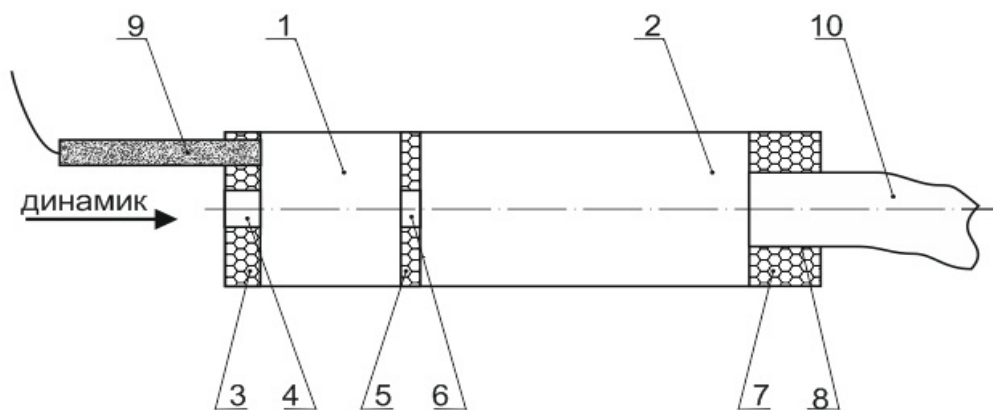


Рис.2.1. Схема экспериментальной установки

В качестве резонатора Гельмгольца была использована труба, в передней крышке которой имеется входное отверстие играющее роль входного сопла, помимо этого в эту же крышку вмонтирован микрофон, регистрирующий полезный сигнал, поступающий в резонатор (рис.2.2); также в передней крышке имелось отверстия для подсоединения к манометру жидкостному для измерения перепадов давления внутри полости камеры; в промежуточной крышке имеется выходное сопло аналогичное входному, но немного с другим

диаметром. В заднюю крышку вмонтирована гибкая труба большого сечения, соединенная с вакуумным насосом, для создания скоростной струи воздуха. Вакуумным насосом, который подключен к ЛАТРу, изменяется давление внутри полости камеры СРГ путем изменения напряжения на ЛАТРе.



- 1 - струйный резонатор Гельмгольца, 2 - предкамера,  
3 - крышка передняя, 4 - входное сопло, 5 - крышка промежуточная,  
6 - выходное сопло, 7 - крышка задняя, 8 - горло заднее,  
9 - микрофон измерительный, 10 - шланг.

Рис.2.2. Схематичное изображение СРГ

Табл. 2.1. Геометрические параметры резонатора

Параметр	Значение
Диаметр камеры, $D_k$ (внутренний)	78мм
Длина камеры резонатора, $L$ (снаружи)	336мм
Толщина передней крышки (с микрофоном)	10мм
Толщина промежуточной крышки	16мм
Толщина задней крышки (в нее устанавливается шланг от насоса)	50 мм
Диаметр входного сопла, $D_1$	10мм
Диаметр выходного сопла, $D_2$	14мм
Толщина стенки камеры резонатора	1мм

## 2.2 Ход эксперимента

В ходе эксперимента для генерации белого шума и воспроизведения с динамика использовалась программа «CoolEditPro», предварительно установленная на компьютер. Сгенерированный сигнал поступал на усилитель низких частот, после чего усиленный сигнал подавался на динамик, установленный на одном уровне с резонатором Гельмгольца. Расстояние между динамиком и резонатором составляло 20 см, и оставалось неизменным на протяжении первой части эксперимента.

В программу «CoolEditPro» запускали генерацию шума. На устройстве усилителя была установлена величина -15dB, которая также не менялась.

Диаметр входного и выходного сопла на протяжении всего эксперимента оставался постоянным, так как именно эти размеры сопел в соотношения  $D_1/D_2$  и  $L/D_1$  давали наилучшую генерацию пульсации давлений. Поэтому остальные размеры сопел в рассмотрение взяты не были.

Как при озвучивании, так и при продувании камеры СРГ струей воздуха длина менялась от 10 мм до 50 мм с шагом 5 мм. При больших длинах камеры АЧХ не давала каких-либо видимых результатов, поэтому дальнейшее увеличение длины камеры не взято на рассмотрение.

Последовательно изменяя длину, для каждой из них был записан полезный сигнал от резонирующей камеры, поступающей от конденсаторного микрофона. Сигнал с микрофона поступал на усилитель «Robotron», и далее через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) в компьютер. Используя программу «PowerGraph», были получены спектры полезных сигналов, соответствующие различным длинам полости камеры.

### 2.2.1 Исследование зависимости собственных частот СРГ при озвучивании камеры белым шумом

В первой части эксперимента, камера СРГ подвергалась акустическому воздействию. Тем самым, под действием акустических колебаний, а то есть

белого шума, мы исследовали резонатор на собственные частоты. В следствие чего, мы получили спектральные картины (АЧХ) (см приложение А).

На основе амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), исследованных с помощью программы «Powergraph» , были получены экспериментальные значения частоты резонанса, соответствующие максимальной амплитуде для полученного сигнала и соответствующей определенной длине камеры.

Также были рассчитаны теоретические значения частот резонанса на основе формулы (1.19).

Результаты экспериментальных и теоретических значений частот приведены в таблице 2.2.

Табл.2.2. Значения частот резонанса, полученные экспериментальным и расчетным путем

Длина камеры, м	$f_{\text{теор}}$ , Гц	$f_{\text{практ}}$ , Гц	отклонение, %
0,01	782,94	653,7544	16,50006
0,015	639,2678	583,2248	8,766753
0,02	553,6222	523,546	5,432619
0,025	495,1747	474,7179	4,131235
0,03	452,0306	455,7292	0,81821
0,035	418,499	423,1771	1,11782
0,04	391,47	395,214	0,09564
0,045	369,0815	368,9236	0,04277
0,05	350,1414	314,6701	10,13057

Исходя из этих данных, были построены зависимости для теоретических и экспериментальных значений резонансных частот от длины камеры.

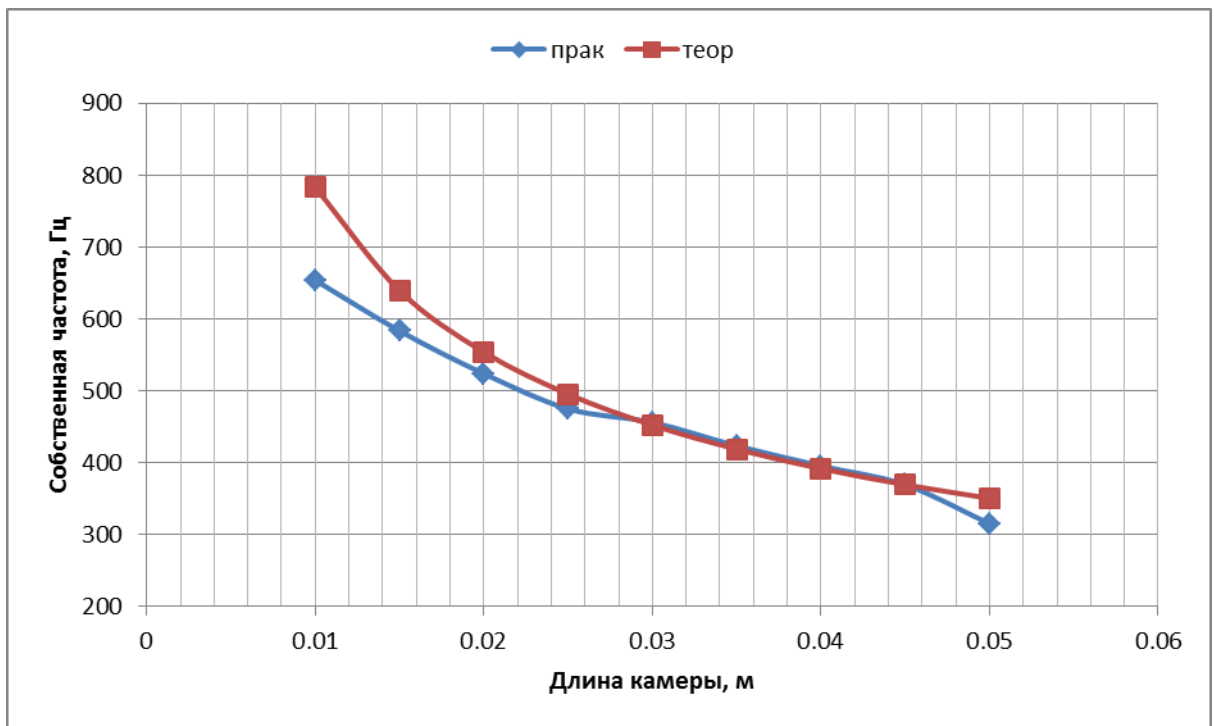


Рис. 2.3. Кривые зависимости собственной частоты камеры СРГ от длины камеры

#### Обсуждение результатов:

Как видно из графиков: теоретическое и практическое значения очень близки между собой, что говорит о не плохом совпадении эксперимента с теорией.

Также выявлено, что с увеличением длины камеры:

- собственная частота камеры уменьшается;
- отклонение от правильного результата уменьшается и колеблется от 0,04 до 16,5%.

По предположению, отклонение может обуславливаться откликом предкамеры между промежуточной и задней крышкой.

На длине от 40 мм до 50 мм, наблюдается размытие АЧХ, и явного пика выявить невозможно. Все представленные выше результаты для камеры от 40 мм до 50 мм основываются лишь на показаниях приборов. Никаких качественных выводов для этих длин камер сделать нельзя. Во второй части эксперимента, где мы еще обратим на это внимание, данное размытие АЧХ

внесет свой вклад в качестве затруднения исследования СРГ именно на этих длинах.

### 2.2.2 Исследование зависимости собственных частот СРГ от скорости потока струи воздуха

Во второй части эксперимента была исследована камера СРГ на частотах, в которых происходила генерация пульсаций давления посредством возбуждения СРГ потоком струи воздуха. Данные полученные в ходе эксперимента, представлены в табл. Б (см приложение Б). В ней отображены экспериментальные значения, на которых наблюдалась генерация пульсаций давления СРГ в зависимости от параметрических размеров, а то есть от длины камеры. Соответственно при изменении длины камеры резонаторы менялось и соотношение  $L/D_1$ . Экспериментальные данные можно использовать для построения в координатах  $(S_L, L/D_1)$ .

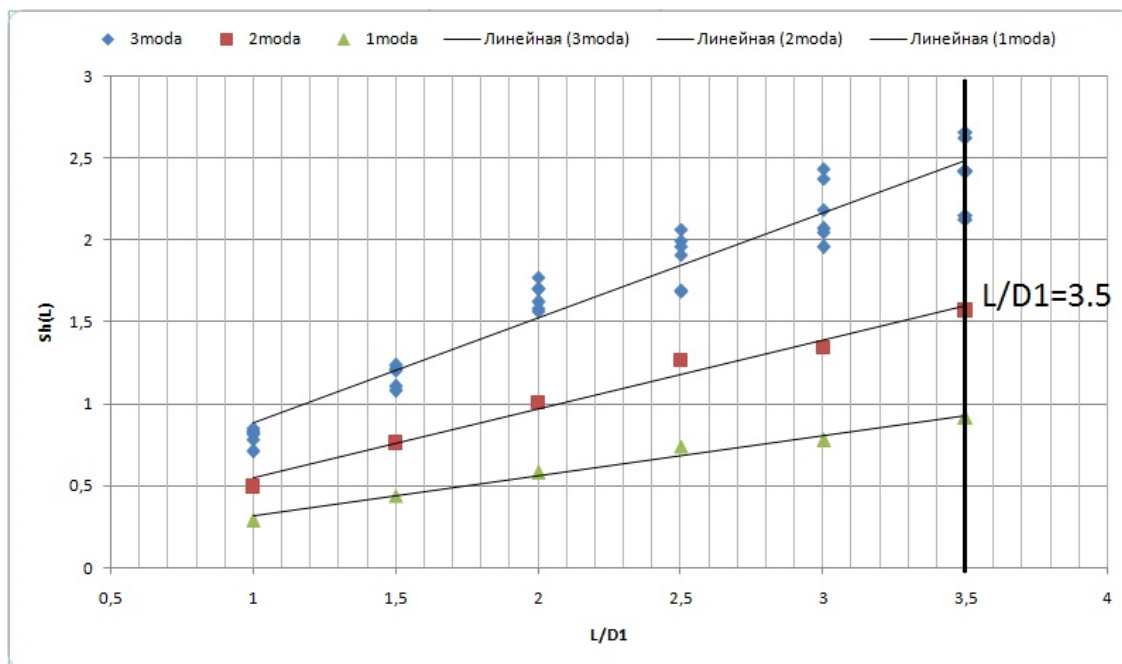


Рис. 2.4. Области эффективной работы осциллятора для первых трех мод

Видно, что область эффективной работы ограничена прямой предельной линией, которая является прямая  $L/D_1 = 3,5$ , отражающая тот факт, что за

пределами этого расстояния вязкий слой смещения струи становится слишком толстым и не усиливает пульсации, либо не генерирует их.

В течение второй части эксперимента наблюдалось следующее:

- при постепенном увеличении скорости струи, давление в камере проходит через последовательные периоды колебаний. Каждый период колебаний соответствует определенной «моды» колебаний;
- наименьшая скорость струи, при которой можно различать первый пик в спектре давления, равна  $\sim 3.5$  м/с;
- частота пульсаций любой заданной моды всегда медленно возрастает с ростом скорости струи, а амплитуда сначала возрастает, достигает максимума, а затем затухает.

В проведенном эксперименте оказалось возможным исследовать три первые моды, это обуславливается геометрическими параметрами самого резонатора. Поэтому, после проведенных наблюдений внимание было сосредоточено только на этих трех модах, показавших потенциальные возможности возбуждения СРГ, и представленные результаты относятся именно к этим первым трем модам.

Резонансная частота СРГ  $f_R$  при возбуждении его струей, при которой возникает максимум амплитуды давления выше собственной акустической частоты  $f_0$ , вероятно, из-за наличия течения через резонатор. По предположению можно ожидать, что различие этих частот зависит от числа Маха струи, но эту зависимость установить не получилось.

Исходя из вывода, полученного в первой части эксперимента, измерения проводились от 10 мм до 50 мм длины камеры, но результаты представлены для камеры длиной от 10 мм до 35 мм, так как начиная с длины камеры в 40 мм при рассмотрении спектральной картины в программе «PowerGraph» в режиме реального времени наблюдалось размытие АЧХ аналогичное размытию, которое мы наблюдали в первой части эксперимента. Явного пика не наблюдается.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате обзора научной литературы и проведенного расчетно-экспериментального исследования получены следующие результаты:

- СРГ представляет собой устройство, способное генерировать высокоинтенсивные низкочастотные колебания и обладающее потенциальными возможностями его практического использования;
- разработана методика проведения исследований и создана экспериментальная установка, позволяющая изучать процесс возбуждения колебаний СРГ и его частотные характеристики;
- экспериментально установлены зависимости частот собственных колебаний СРГ от его геометрических характеристик. Выявлена область эффективной работы СРГ, в зависимости числа Струхала и отношения  $L/D_1$ . Полученные результаты согласуются с данными, опубликованными в работах различных авторов.

Полученные практические данные могут быть использованы в качестве опорных, например, для исследований по повышению эффективности проектируемых скважинных генераторов колебаний, предназначенных для воздействия на продуктивные пласты при добыче нефти.

Основные положения выпускной квалификационной работы были доложены на I-й Международной школе-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Биомедицина, материалы и технологии XXI века» (Казань, 25-28 ноября 2015 г.) и Итоговой научно-образовательной конференции студентов института физики КФУ (Казань, 15 мая 2016 г.).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубень А.П. Исследование акустического течения в горле резонатора // Акустический журнал, 2012, Т. 58, №1, с. 80-92.
2. Музипов Х.Н. Акустическое устройство измерения зенитного угла скважины при бурении // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2014. Т.12, №1, с. 1-2.
3. Кузнецов Л.А. Акустика музыкальных инструментов. Справочник – М: Легпромбытиздат, 1989. – 368с.
4. Сапожков М.А. Акустика. Справочник – М.: Радио и связь, 1989. – 336с.
5. Пимштейн В.Г. Альбом. Аэроакустические взаимодействия в турбулентных струях. – Учебное пособие. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 84с. – ISBN 978-5-992-1232-1.
6. Блохинцев Д.И. Журнал технической физики, 1945, Т. 15. №.1 с. 3-5
7. Morel Th. Experimental Study of a Jet-Driven Helmholtz Oscillator, ASME Paper 78-WA/FE-16.
8. Морз Ф. Колебания и звук. – М.: ГИТТЛ, 1949. – 456 с.
9. Moore C.J. The role of shear layer instability waves in jet noise // J. Fluid Mech., – 1977, – 80, – P. 321–367.
10. Rockwell D., Naudascher E. Self-sustaining oscillations of impinging free shear layers // Annual Review of Fluid Mechanics, – 1979, – 11, P. 67–94.
11. Shen Z.H. et al. Theoretical analysis of jet-driven Helmholtz resonator and effect of its configuration on the water jet cutting property // 9th Intern. Symp. Jet Cutt. Tech., Sendai, Japan, October 1988, Cranfield, BHRA, – 1988, – P. 189–201.
12. Кондратьев В.И., Назаренко Т.И. Клиновой тон и его усиление // Аэроакустика. – М.: Наука, 1980. – С. 112–118.
13. Константинов Б.П. Гидродинамическое звукообразование и распространение звука в ограниченной среде / АН СССР, Акуст. ин-т. – Л.: Наука Ленингр. отд., 1974. – 144 с.

14. Bechert D.W. Sound absorption caused by vorticity shedding, demonstrated with a jet flow // *Sound and Vibr.* – 1980. – N 70(3), – P. 389–405.
15. Powell A. On the Edgetone // *JASA.* – V. 33. №4. P. 395–409.
16. Richardson E.I. Edge tone // *Proc. Phys Soc. London.* – 1931. – 43. – P.394–404.
17. Morel T. Jet-driven Helmholtz fluid oscillator [General Motors Corp.], 01.07.76/16.08.77.
18. Исаакович М.А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – 456 с.
19. Комкин А.И. О присоединенной длине отверстий. Классические проблемы линейной акустики и теории волн. // *Акустический журнал*, 2012, т. 58, № 6, с.677-682
20. Зевеке Г.В., Ионкин П.А. и др. Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 1989. – 312 с.
21. Пимштейн В.Г. Аэроакустические взаимодействия. Структура и шум турбулентных струй / Альбом ЦАГИ. – 1999. – 64 с.
22. Теория турбулентных струй / Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенинников С.Ю. и др. – М.: Наука, 1984. – 716 с.
23. Абрамович Г.Н. Влияние крупных вихрей на структуру турбулентных течений со сдвигом // *Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа.* – 1979. № 5. – С. 64-73.
24. Ахметов Д., Кисаров О. Гидродинамическая структура кольцевого вихря. – *ПМТФ*, 1966. – №4. – С. 26-34.
25. Белоцерковский С.М., Гиневский А.С. Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей. – М.: Физматлит, 1995. – 368 с.
26. Марфин Е.А. Повышение энергетической эффективности теплотехнологических систем предприятий нефтяной промышленности: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04: защищена 28.04.06: утв: 13.10.06. – Казань, 2006. – 147 с.

Графики АЧХ полученные в ходе озвучивания камеры (длиной от 10 мм до 50 мм с шагом 5 мм соответственно) белым шумом

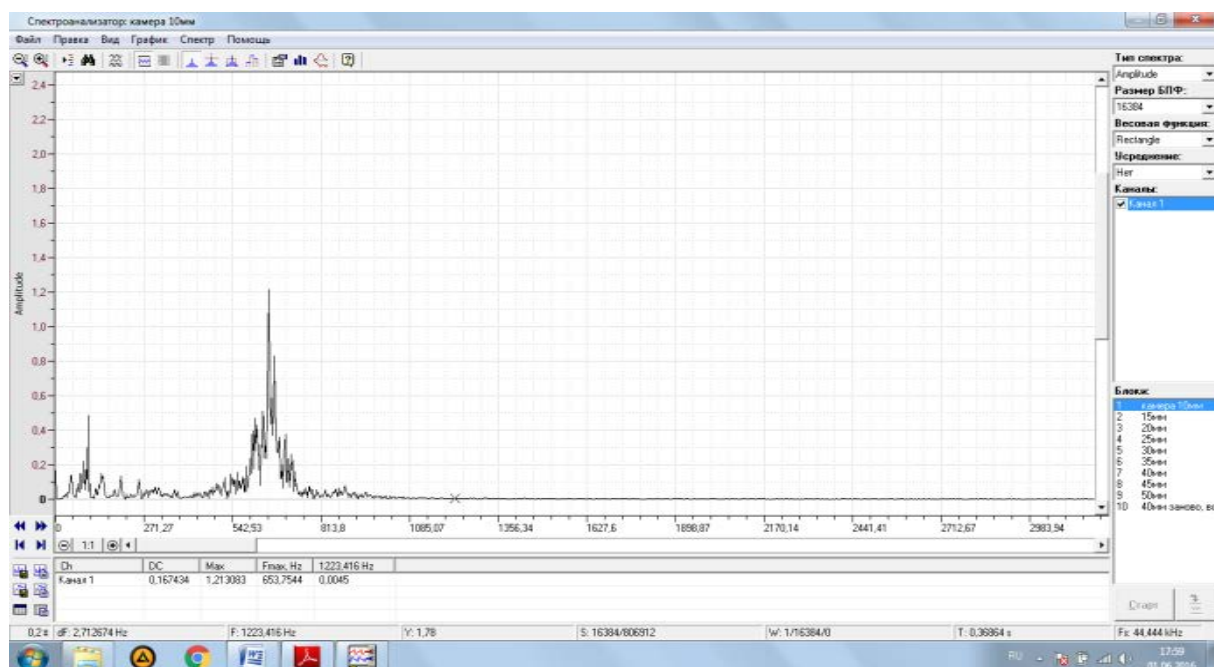


Рис.А.1. АЧХ в ходе озвучивания камеры длиной 10 мм белым шумом



Рис.А.2. АЧХ в ходе озвучивания камеры длиной 15 мм белым шумом



Рис.А.3. АЧХ в ходе озвучивания камеры длиной 20 мм белым шумом

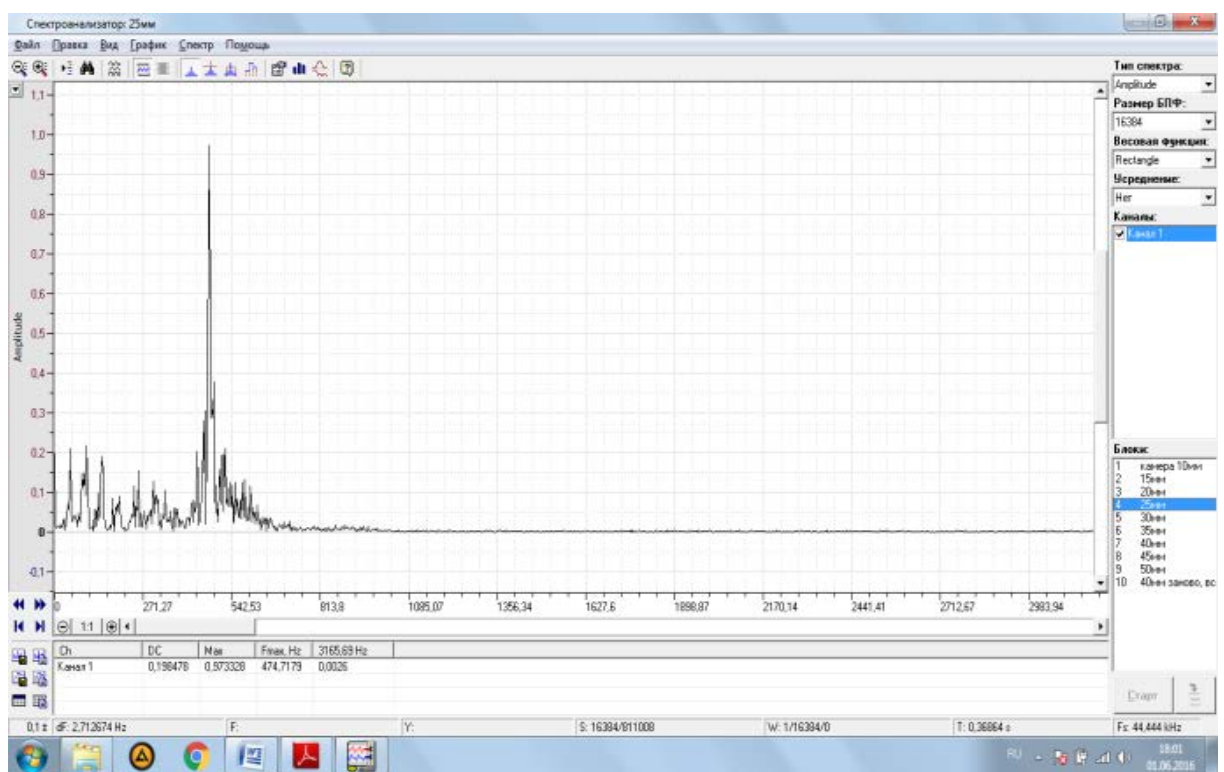


Рис.А.4. АЧХ в ходе озвучивания камеры длиной 25 мм белым шумом

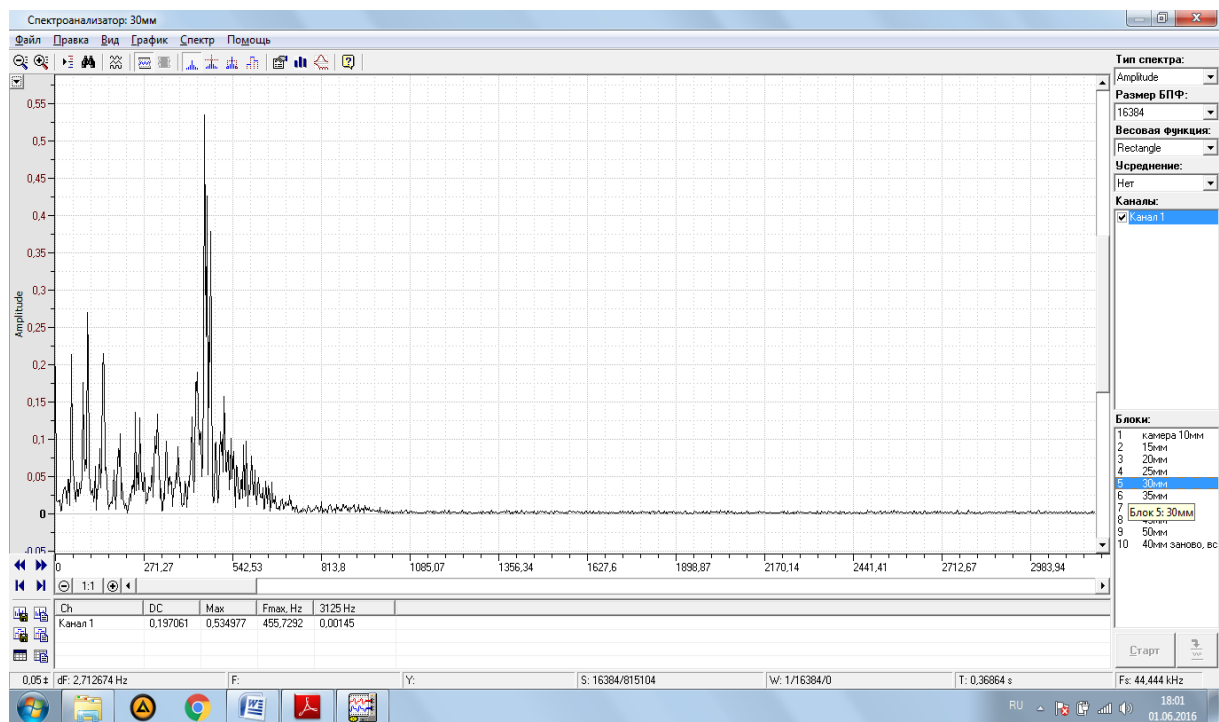


Рис.А.5. АЧХ в ходе озвучивания камеры длиной 30 мм белым шумом

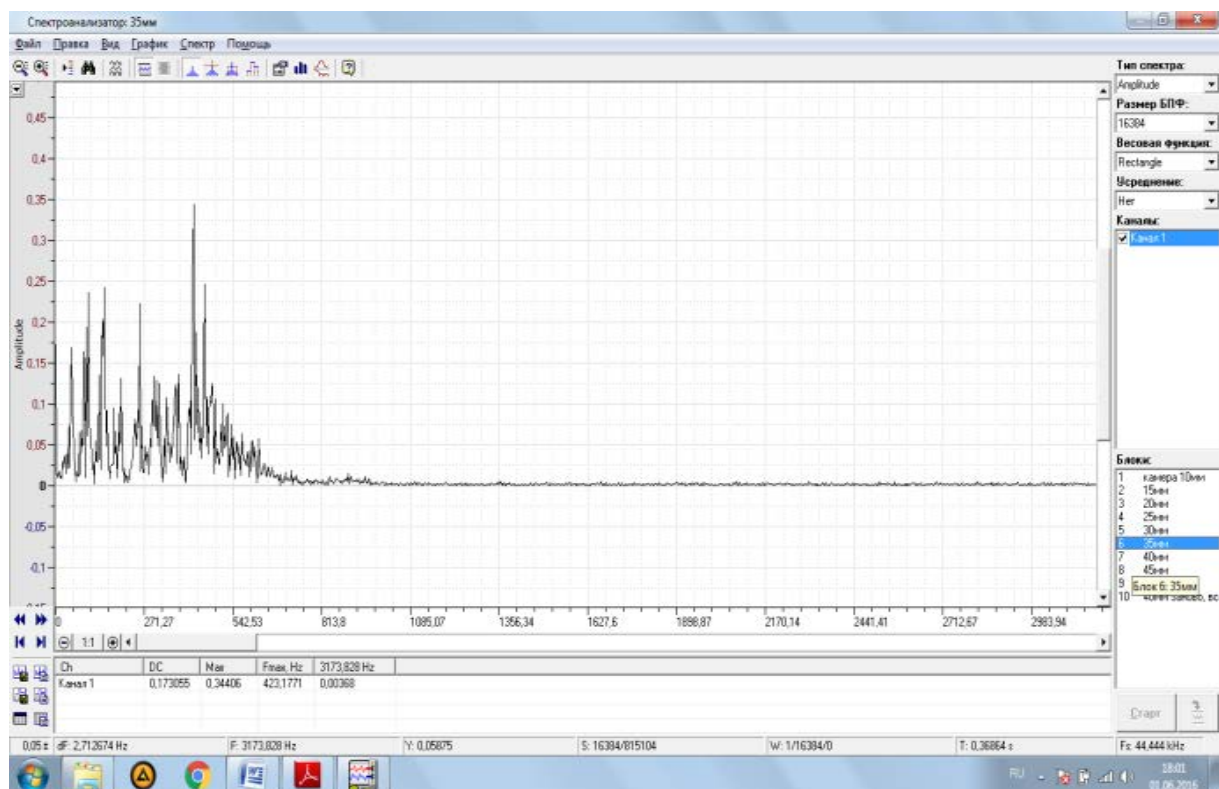


Рис.А.6. АЧХ в ходе озвучивания камеры длиной 35 мм белым шумом



Рис.А.7. АЧХ в ходе озвучивания камеры длиной 40 мм белым шумом

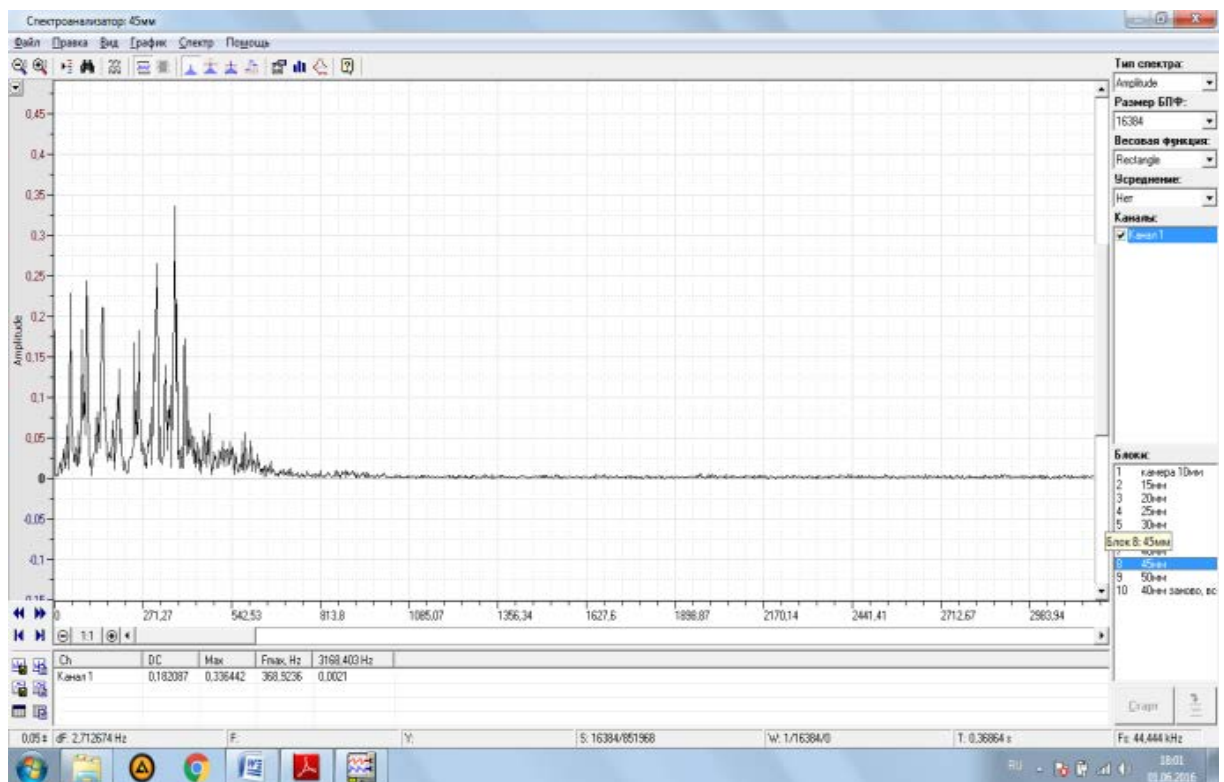


Рис.А.8. АЧХ в ходе озвучивания камеры длиной 45 мм белым шумом

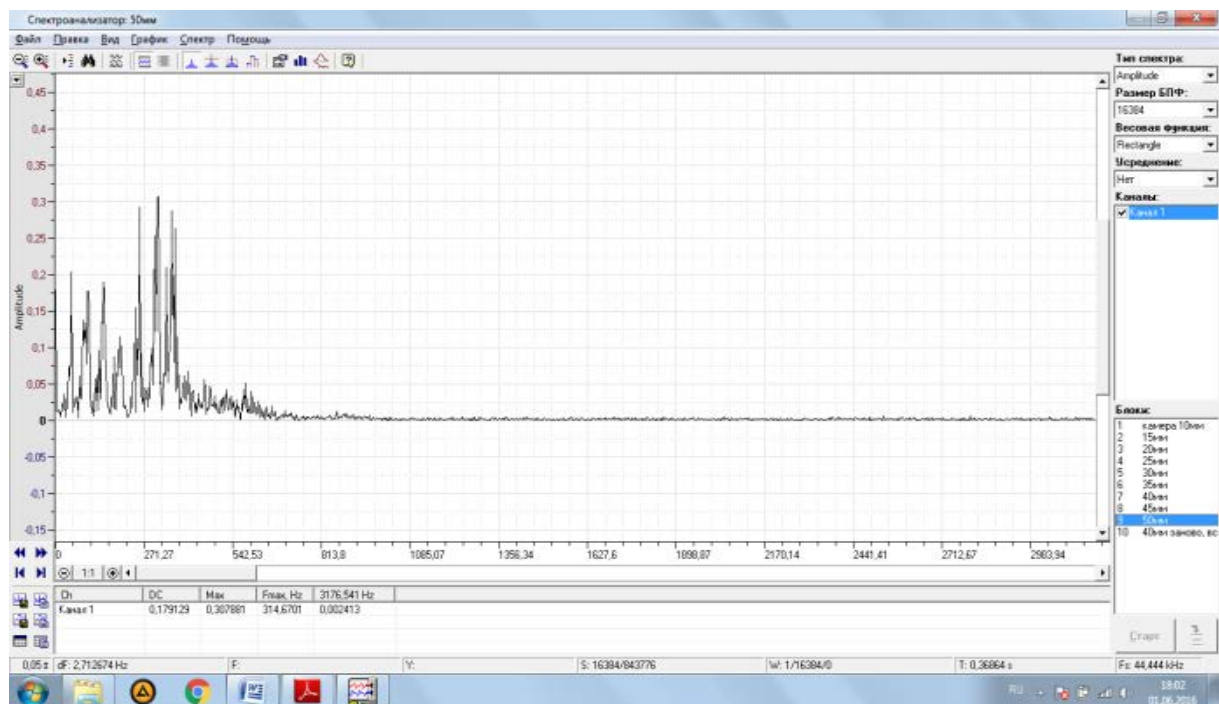


Рис.А.9. АЧХ в ходе озвучивания камеры длиной 50 мм белым шумом

Табл. Б.1 Данные о резонансных частотах, полученных практическим измерением с установки (СРГ) при помощи программы «PowerGraph».

Мода, №	Скорость, м/с	Длина камеры, м	Частота, Гц	Число Струхаля Sh	L/D1
1	2	3	4	5	6
1	3,5	0,01	101,6	0,290286	1
1	3,5	0,015	102	0,437143	1,5
1	3,5	0,02	101,9	0,582286	2
1	3,5	0,025	104	0,742857	2,5
1	4	0,03	103,8	0,7785	3
1	4	0,035	104,8	0,917	3,5
1	4	0,04	105,2	1,052	4
1	4	0,045	106,4	1,197	4,5
1	4	0,05	104,2	1,3025	5
2	4	0,01	198,1	0,49525	1
2	4	0,015	203	0,76125	1,5
2	4	0,02	201,8	1,009	2
2	4	0,025	202,3	1,264375	2,5
2	4,5	0,03	201,8	1,345333	3
2	4,5	0,035	202,1	1,571889	3,5
2	4,5	0,04	203,4	1,808	4
2	4,5	0,045	201,7	2,017	4,5
2	4,5	0,05	200,1	2,223333	5
3	6	0,01	502	0,836667	1
3	6,5	0,01	538,2	0,828	1
3	7,5	0,01	610,6	0,814133	1
3	8	0,01	683	0,85375	1
3	9	0,01	707,8	0,786444	1
3	10,5	0,01	745	0,709524	1
3	6,5	0,015	523	1,206923	1,5
3	7	0,015	567	1,215	1,5
3	7,5	0,015	608	1,216	1,5
3	8	0,015	659	1,235625	1,5
3	9,5	0,015	701	1,106842	1,5
3	10,5	0,015	756	1,08	1,5
3	6	0,02	510	1,7	2
3	6,5	0,02	554	1,704615	2
3	7	0,02	620	1,771429	2

Продолжение Табл. Б1					
1	2	3	4	5	6
3	8,5	0,02	674	1,585882	2
3	9	0,02	731	1,624444	2
3	10	0,02	783	1,566	2
3	6	0,025	496	2,066667	2,5
3	6,5	0,025	520	2	2,5
3	7,5	0,025	589	1,963333	2,5
3	8	0,025	612	1,9125	2,5
3	9,5	0,025	641	1,686842	2,5
3	10	0,025	679	1,6975	2,5
3	6	0,03	487	2,435	3
3	6,5	0,03	515	2,376923	3
3	7,5	0,03	547	2,188	3
3	8,5	0,03	587	2,071765	3
3	9	0,03	614	2,046667	3
3	10	0,03	653	1,959	3
3	6	0,035	456	2,66	3,5
3	6,5	0,035	488	2,627692	3,5
3	7,5	0,035	520	2,426667	3,5
3	8	0,035	552	2,415	3,5
3	9,5	0,035	584	2,151579	3,5
3	10,5	0,035	638	2,126667	3,5