

Министерство образования и науки РФ

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

**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
КАФЕДРА РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

Направление: 011800.62 «РАДИОФИЗИКА»
Профиль подготовки: Радиофизические методы по областям применения

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Бакалаврская работа)**

**Частотные характеристики
акустических резонаторов**

Работа завершена:

“ ___ ” _____ 2015 г. _____ Бурдин С.А.

Работа допущена к защите:

Научный руководитель:

к.т.н., старший преподаватель

“ ___ ” _____ 2015 г. _____ Марфин Е.А.

Заведующий кафедрой,

д.ф.- м.н., профессор

“ ___ ” _____ 2015 г. _____ Овчинников М.Н.

Казань – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Глава 1.Метод акустического воздействия на пласт.....	5
Глава 2.Акустические резонаторы	12
Глава 3.Экспериментальная установка.....	16
Глава 4.Экспериментальные данные.....	17
Заключение.....	33
Список литературы.....	34

ВВЕДЕНИЕ

Акустика – наука о звуке, в которой рассматривается физическая природа звука и проблемы связанные с ним. Акустика – направление физики, которое изучает распространение волн от самых низких до высоких частот. Традиционно все привыкли ставить данную науку в один ряд с музыкой. Но это лишь малая часть того, где применяется данная область физики. Для нас сейчас данная тема актуальна, если посмотреть с точки зрения нефтедобывающей отрасли. В наши дни существует проблема добычи трудноизвлекаемой нефти в полном объеме. Поэтому разрабатывают методы для решения этой задачи. Существует множество методов воздействия на пласт. Мы будем рассматривать один из эффективных – акустический. Рассмотрев данный метод, мы сможем сделать выводы, на сколько он может быть эффективен в применении. Данный метод является родственником таких методов как вибрационный и сейсмический. Во всех случаях мы при помощи каких-либо приборов порождаем колебания в скважине. Было давно замечено, что такие методы увеличивают нефтеотдачу. Такая проблема особенно остро стоит в Татарстане, и по России в целом. В нашем районе нефть достаточно тяжелая. Под тяжелой нефтью принято понимать так называемую нефть с большим содержанием парафином, и, как правило, она имеет достаточно вязкую структуру. На сегодняшний день в среднем нефтеотдача пласта составляет порядка 30%. Использование акустических методов воздействия на пласт предполагает, по некоторым расчетам, увеличить этот показатель на 5-10%. В данной работе будем рассматривать некоторую модель скважины – акустический резонатор, или резонатор Гельмгольца. Более подробно об этом устройстве будет сказано позже. Но суть состоит в том, что в скважине будут формироваться колебания так, как бы они формировались в акустическом резонаторе. Поэтому цель работы будет заключаться в исследовании частотных характеристик таких резонаторов. Нахождение частот, которые будут возникать, будет давать ответ на вопросы – какие колебания мы должны возбудить в скважине, чтобы

амплитуда этих колебаний была такова, чтобы они не затухали долгое время, и соответственно, давали большее воздействие на пласт и на повышение нефтеотдачи в целом. Задача будет заключаться в нахождении данных частот, в конце будут сделаны выводы - какой тип оценки параметров резонатора максимально подходит под теоретическое описание, и в целом, насколько можно представлять акустический резонатор как модель скважины.

ГЛАВА 1. МЕТОД АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛАСТ

На сегодняшний день разработка нефтяных и нефтегазовых месторождений в России и в крупных нефтедобывающих регионах обусловлена увеличением доли трудноизвлекаемых запасов нефти и малоэффективных залежей.

К трудноизвлекаемым относят запасы углеводородов, расположенных в карбонатных и малопроницаемых терригенных коллекторах с высокой зональной и послойной неоднородностью, представленных глинистыми песчаниками, алевролитами, а наряду с ними запасы высоковязких нефтей и водонефтяных зон.

Наличие в разрезе залежей разных по типу и составу насыщающих их флюидов требует одновременного применения различных технологий воздействия, что очень усложняет извлечение нефти.

К малоэффективным относятся месторождения, у которых при традиционных технологиях разработки получают с низкими технико-экономическими показателями и обеспечивают нефтеотдачу всего лишь 20...30%.

Причиной этому являются маленькие размеры месторождений, их разбросанность и удаленность от коммуникаций и дорожной сети, низкая концентрация запасов по залежи и разрезу, малодобитность (около 1...3т/сут) скважин, товарное качество нефтей, которое оставляет желать лучшего (обусловлено высоким содержанием серы(>1,9%) и парафина).[1]. Для справки, дебит - объем продукции, добываемой из скважины за единицу времени. Также, к этому перечню можно дополнить такое негативное явление, как образование тупиковых слабодренируемых зон наряду с практически полностью промытыми и выработанными участками. Зоны, которые не охвачены вытеснением, образуются вследствие геометрической неоднородности потоков агента, неоднородности коллектора по

проницаемости, его прерывивости, наличия зон слияния, стягивания между добывающими и нагнетательными рядами скважин. В целом по России доля трудноизвлекаемых и малоэффективных запасов составляет более 60%.

В литературе для обозначения воздействия на ПЗС и пласт существует много терминов: вибрационное, акустическое гидроакустическое, волновое, гидроволновое, виброударное, вибросейсмическое, сейсмоакустическое и др.

Здесь необходимо выделить, чтобы избежать путаницы понятий, такое обстоятельство. Понятие волнового процесса можно вводить и судить о волновом воздействии на ту или иную материальную среду, лишь начиная с расстояния от источника возмущения $L > CT$, где L - линейный размер системы, C - скорость распространения возмущения, T - время его изменения. При расстояниях $L < CT$ можно говорить лишь о зонах формирования волны. В случае использования упругих колебаний можно рассматривать воздействия в этих зонах как виброволновые, импульсно-ударные, вибросейсмические и другие в зависимости от применяемых источников. За пределами этих зон распространяются упругие волны. Очевидно, это слабые возмущения, которые представляют собой фактически акустические волны в самом широком диапазоне частот. Такие волны, используемые в низкочастотном диапазоне до 10^3 Гц, представляют собой низкочастотные акустические, а выше 10^3 Гц - высокочастотные. Волны в диапазоне частот до 100 Гц, используемом в основном в сейморазведке, обычно так и называют - сейсмоакустические. [2]

Для дальнейшего рассмотрения интересующего нас в большей мере - акустического метода воздействия, дадим определение призабойной зоне пласта. Итак, призабойная зона пласта (в дальнейшем ПЗП) - это часть общей пластовой гидродинамической системы, где фильтрация флюидов происходит при повышенных скоростях, градиентах давления и температуры и осложняется появлением трещиноватых, неоднородных по проницаемости зон, фазовых переходов. Призабойная зона находится в неравновесном термодинамическом состоянии активного энергообмена и массообмена со скважиной и пластом, при этом ее состояние непрерывно изменяется в ходе разработки месторождений.

Размер призабойной зоны оценивают по радиусу зоны нарушения линейного закона фильтрации, которая может простираться на 6...23м от оси скважины. Даже не смотря на то, что размеры столь малы, ПЗП во многом определяет процесс разработки всего месторождения нефти в целом. Это особенно относится к месторождениям с трудноизвлекаемыми запасами, вскрывающими неоднородные и низкопроницаемые пласты.

Рассмотрим поподробнее акустические методы воздействия на призабойную зону пласта. К этой группе относят методы воздействия упругими колебаниями, имеющими сформированный волновой характер непосредственно в ПЗП. Учитывая реальные размеры ПЗП и необходимость соблюдения условий прозрачности, при прохождении акустических волн через обсадные трубы, можно получить частоты выше 1000 Гц, т.е. высокочастотные акустические воздействия. При высокочастотном акустическом воздействии на ПЗП и развитии вблизи источника достаточно большой интенсивности в локальных объемах среды наблюдаются собственно волновые явления: искажение формы волны, возникновение звукового давления, акустические течения и другие, которые проявляются в изменении проницаемости насыщенных пористых сред, увеличении скорости фильтрации, понижении сдвиговой вязкости флюидов, повышении давления насыщения растворенных газов с усилением газовыделения, увеличении теплопроводности и в других явлениях.

Акустические методы можно разделить на две подгруппы по типу используемых волновых источников: именно пьезокерамических, магнитострикционных преобразователей и высокочастотных гидродинамических генераторов кавитационного типа.

Изначально были разработаны магнитострикционные и пьезокерамические излучатели. Пьезокерамические преобразователи оказались более предпочтительны, так как их КПД достигал порядка 50%. Благодаря этому они нашли очень широкое применение для акустического воздействия на ПЗП с целью восстановления продуктивности добывающих и производительности нагнетательных скважин. Преобладающая частота таких

излучателей составляет 19...25 кГц, поэтому и метод называется высокочастотным акустическим. Данные излучатели входят в состав аппаратуры (рис. 1), включающей скважинный снаряд (излучатель), опускаемый на каротажном кабеле в скважину, и наземный блок питания и управления. При работе излучателя в скважине возбуждается акустическое поле интенсивностью 10 кВт/м² и более, при этом развиваются градиенты давления порядка 0,1-0,01МПа на 1 м. Интенсивность в породе вблизи скважины составляет 1кВт/м², что обеспечивает интенсивность порядка 0,2 кВт/м² в породе на расстоянии около 1 м от стенки. В данной области конечно же есть разработки, которые внедряются во многих местах. Расскажу о некоторых из них.

Модификация акустических методов, заключающаяся в очистке перфорационных каналов после производства перфорационных работ с использованием высокочастотного акустического воздействия, создаваемого пьезокерамическим излучателем была разработана Орловым Г.А. и успешно внедряется при освоении и доосвоении скважин на месторождениях ОАО «Татнефть». В.В. Дрягиным и Г.В. Иголкиной в ЗАО «Интенсоник» совместно с ИГ Уро РАН разработан и был внедрен акустический метод воздействия в скважинах для восстановления проницаемости и оценки насыщенности коллекторов. Метод основан на возбуждении в зоне перфорации добывающих или нагнетательных скважин силового акустического поля и регистрации естественной и вызванной сейсмоакустической эмиссии (САЭ) горных пород в диапазоне 10...20000 Гц до и после акустического воздействия ААВ-400. Акустическое излучение имеет интенсивность ~ 10 Вт/см², частоту ~ 19кГц. Регистрация САЭ осуществляется пьезодатчиком. В результате проведенных работ по методу каротаж – воздействие – каротаж достигнуто повышение продуктивности скважин на ряде месторождений Западной Сибири, Республики Башкортостан и Казахстана, установлено, что в коллекторе, насыщенном нефтью или газом, после ВЧ акустического воздействия наблюдалось увеличение высокочастотной ВЧ составляющей энергии САЭ по

сравнению с исходным значением, а в коллекторе, насыщенном водой, наблюдалось его снижение.

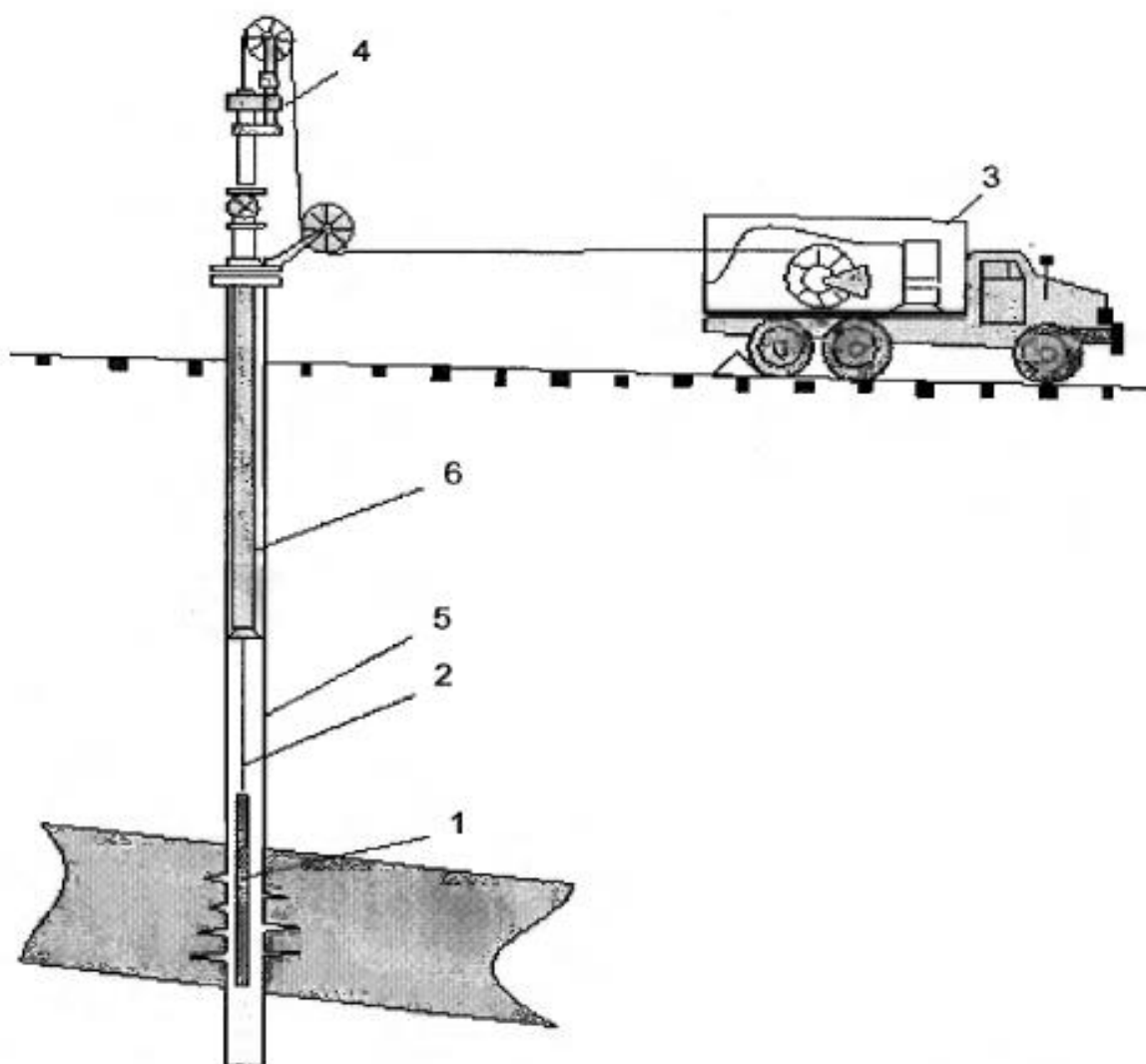


Рисунок 1. Общий вид аппаратуры акустического воздействия: 1 - скважинный источник ВЧ акустических колебаний; 2 – кабель; 3 – наземная геофизическая станция с генератором, пультом управления и лебедкой; 4 – блок и лубрикатор; 5 – обсадная колонна; 6 – насоснокомпрессорные трубы

В настоящее время накоплено большое количество опыта по применению акустических методов с использованием магнитострикционных и пьезокерамических преобразователей. Обработано более 2000 скважин на месторождениях с различными геолого-физическими характеристиками. Эти методы просты, надежны, не требуют больших затрат. При этом достигается высокая эффективность при обработках высокодебитных (фонтанных),

вскрывающих высокопроницаемые пласты скважин, у которых закольматированная составляет десятки сантиметров.

Ограничения – при использовании на месторождениях с низкопроницаемыми коллекторами, невысокими пластовыми давлениями, на малодебитными фонде скважин, сложности сочетания с физико – химическими методами, депрессионно- репрессивным воздействием. Областью применения их является очистка перфорационных каналов от продуктов вскрытия пластов, АСПО и других включений, декольматация ближней зоны ПЗП в скважинах, вскрывающих высокопроницаемых пласты с повышенным пластовым давлением.

В 80-х годах XX века в УНИ были разработаны вихревые гидродинамические генераторы типа ГАП и ГД. Генерация колебаний в этих устройствах основана на возбуждении собственных частот закрученного слоя жидкости. Основным конструктивным элементом этих устройств является форсунка с соплом. Подача рабочей жидкости осуществляется через тангенциальные отверстия. К подобным гидравлическим устройствам относится также генератор, созданный в УНИ. Позднее появились волновые генераторы, разработанные в Институте машиноведения РАН под руководством Р.Ф. Ганиева. Как показали стендовые испытания, все вышеуказанные устройства генерировали колебания низкой амплитуды с низкой амплитудой с низким значением среднеквадратичного давления и в то же время создавали высокие потери напора нагнетаемой жидкости за счет существенного штуцирования потока. Функционирование всех генераторов сопровождалось значительным кавитационным износом тангенциальных отверстий и поверхности вихревой камеры, а это в свою очередь, приводило к срыву режима их работы и выходу из строя. Низкая надежность, неустойчивость автоколебательного режима и узость рабочего диапазона расходов ограничивают возможности практического использования устройств. Результаты промысловых испытаний этих устройств, проведенные на большом

фонде скважин Западной Сибири и Урало-Поволжья, подтвердили заключение стендовых испытаний[1].

Ну и конечно, нужно сделать некоторые дальнейшие рассуждения. Все это нужно нам по той простой причине, что в дальнейшем мы будем рассматривать непосредственно модель полостей в пластах. К такой модели можно отнести модель резонатора Гельмгольца. Рассматривать будем процессы которые будут в нем происходить под действием акустического воздействия. Будем рассчитывать на сравнительно небольшие погрешности по сравнению с реальной полостью. И сейчас нам нужно узнать, а что собственно представляет собой резонатор Гельмгольца, какие его свойства, характеристики, виды.

ГЛАВА 2. АКУСТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ

К акустическим колебаниям относят шум, инфразвук, ультразвук, которые могут быть как слышимыми так и не слышимыми. Акустические колебания порядка 16 Гц – 20 кГц называются звуками. Колебания у которых частота менее 16 Гц – инфразвук. Колебания с частотой более 20 кГц – ультразвук. Звук распространяется как переменное возмущение упругой среды, или по-другому, в виде звуковых волн. В свою очередь, звуковые колебания – это колебательные движения частиц среды под действием этого возмущения. Звуковое поле – пространство, в котором могут быть обнаружены звуковые колебания. Звуковые колебания – это один из видов механических колебаний. В жидких и газообразных средах они являются продольными колебаниями, а это значит, что частицы среды колеблются вдоль линии распространения волны.

Звуковые волны распространяются с определенной скоростью – скоростью звука. В разных средах она различна. В газообразных средах скорость звука зависит от плотности среды ρ и статического атмосферного давления p_{ac} :

$$c = \sqrt{\frac{\gamma * p_{ac}}{\rho}} \quad (1),$$

где γ – коэффициент адиабаты, $\gamma = C_p/C_v$, C_p и C_v – теплоемкость среды при постоянном давлении и при постоянном объеме.

В ходе дальнейших рассуждений нам понадобятся характеристики, которыми мы будем описывать звуковое поле. Одной из таких характеристик является звуковое давление.[3].

Звуковое давление – это разность между мгновенным значением давления $p_{ам}$ в точке среды при прохождении через нее звуковой волны и статическим давлением в той же точке, иначе $p = p_{ам} - p_{ac}$. Данная величина знакопеременная: в моменты уплотнения частиц среды она имеет положительный знак, в моменты расширения среды - отрицательный знак.

Звуковое давление представляет собой силу, действующую на единицу поверхности: $p = \frac{F}{S}$.

Резонанс оказывает влияние на колебательные процессы- механические, электрические, звуковые. Влияние резонанса особенно ощутимо в акустике. Полезные резонансы нужно использовать, а с нежелательными приходится бороться. Динамические головки, используемые в системах воспроизведения звука – пример механической колебательной системы, которая заходит в область резонанса.

Резонатор - колебательная система, в которой происходит накопление энергии за счет резонанса с вынуждающей силой. Акустический резонатор (резонатор Гельмгольца) – акустический прибор, представляющий собой сосуд сферической формы с открытой горловиной. Для данного прибора характерно такое явление как резонанс Гельмгольца. Оно подразумевает резонанс воздуха в полости, ярким примером которого служит гудение пустой бутылки от потока воздуха в направлении к ее горлышку.

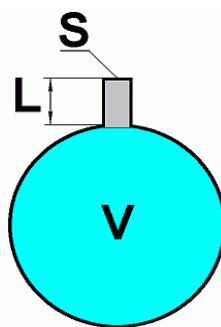


Рисунок 2. Резонатор Гельмгольца

Формула для определения частоты собственных колебаний такого резонатора имеет вид:

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

где F - частота, Гц; c_0 - скорость звука в воздухе (340 м/с); S – сечение отверстия, m^2 ; V – объем резонатора, m^3 ; L – длина отверстия, м.

К примеру, для сосуда объемом 1 л с горлышком длиной 1 см и сечением 1 см^2 частота резонанса составит около 170 Гц. Соответственно длина волны для такой частоты составляет около 2 м, а это значительно больше характерных размеров резонатора. Откуда следует, что о стоячей акустической волне в самом резонаторе не существует. В полости можем возбудить лишь волны для которых выполняется условие: $\lambda \leq \sqrt[3]{V}$.

Для нашего примера это частоты выше 3кГц.

Другой вариант резонатора – органная труба, который мы и будем рассматривать. Стоячие волны возможны в таком резонаторе лишь в тех случаях, когда на длине волны укладывается нечетное число четвертей длин волн. В своей работе я буду рассматривать на конце трубы отверстия различного диаметра. В результате, мы будем получать такое явление, что наш резонатор будет вести себя некоторая система, которая на различных частотах будет иметь различные моды. Иначе говоря, мы будем наблюдать, как с уменьшением диаметра отверстия будет происходить переход от четвертьволнового резонатора к общей модели резонатора Гельмгольца и далее к полуволновому резонатору. В дальнейшем мы найдем практические и теоретические зависимости этих характеристик.

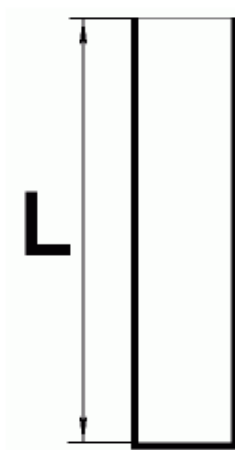


Рисунок 3. Органная труба

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

$$F_{\frac{1}{4}} = \frac{c_0}{4L} * (2p - 1) \quad (3a)$$

$$F_{\frac{1}{2}} = \frac{p*c}{2L} \quad (3б)$$

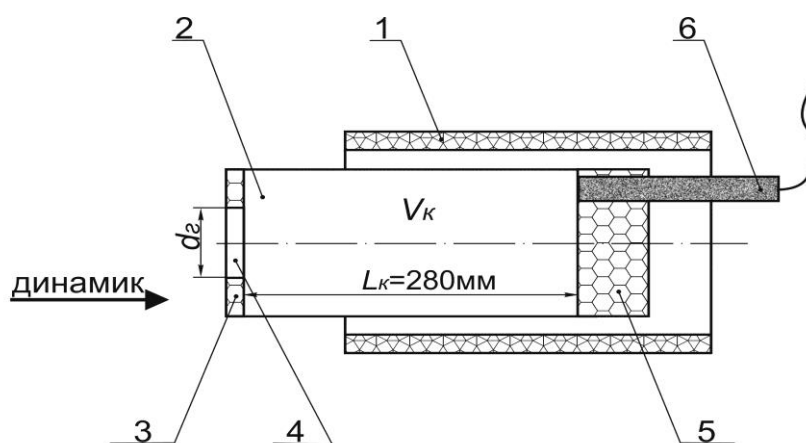
где $p = 1, 2, 3 \dots$ – целое число.

Резонансных частот, как видно из формулы, много, однако, наиболее выражена первая мода колебаний. Для органной трубы, к примеру возьмем частоту настройки 27 Гц, длина трубы составит 3,1 м. [4]

Итак, мы рассмотрели два вида резонатора Гельмгольца. Для каждого из них приведены формулы для вычисления частот, которые могут существовать в данном виде резонатора. В данных формулах, как мы видим, существует лишь зависимость от скорости звука в среде, и характеристических размеров резонатора – объема, длины и диаметра отверстия. В теории все конечно же так. Однако, было замечено, что на практике частоты мы получаем немного отличные от теоретически рассчитанных. В формулах для расчета мы не имеем некоторых неизвестных нам поправочных коэффициентов. Соответственно, целью моей работы будет поиск этих недостающих величин, и попытаемся максимально приблизить практические значения к теоретическим.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для исследования применимости известных формул при расчёте собственных частот акустических систем была изготовлена экспериментальная установка, представляющая собой акустический резонатор, установленный внутри корпуса. Акустический резонатор представлял собой полуцилиндрическую камеру (трубу) с днищем, в котором крепился измерительный микрофон RFT МК201 Robotron. При этом передний торец камеры располагался первоначально в одной плоскости с торцом корпуса или выдвигался впоследствии наружу. Собранная конструкция помещалась перед динамиком, и измерялась частота и амплитуда “белого” шума, распространяющегося от динамика, за камерой резонатора (на днище резонатора). Сравнивался спектр сигнала, распространяющегося от динамика, на одинаковом удалении от источника, при установке микрофона на штативе перед динамиком на расстоянии 400мм, и установке микрофона в днище резонатора, расположенного перед динамиком на расстоянии 100мм. Таким образом, при вычленении сигналов, определялось искажение, вносимое резонатором в первоначальный сигнал[8,9].



1 - корпус установки, 2 - резонатор Гельмгольца,
3 - крышка передняя, 4 - горло переднее,
5 - крышка задняя, 6 - микрофон измерительный.

Рисунок 4. Экспериментальная труба

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Классический четвертьволновой резонатор с фиксированной частотой резонанса можно было превращать в подобие полуволнового резонатора, путём установки в камеру передней крышки с отверстием различного диаметра и, далее, трансформировать его в резонатор Гельмгольца, путём уменьшения диаметра отверстия и увеличения его длины. При этом, ожидалось усиление амплитуды колебаний на частоте, соответствующей сначала четвертьволновому режиму, при большом отверстии, а затем полуволновому режиму, по мере уменьшения диаметра отверстия в передней крышке, и одновременно режиму резонатора Гельмгольца.

Ожидалось, что четвертьволновой резонатор станет всё больше превращаться в полуволновой, частота собственных колебаний которого определяется лишь длиной камеры и ровно вдвое выше, чем у четвертьволнового при той же длине камеры.

Первоначально было неизвестно, станет ли резонатор с большим горлом усиливать падающий сигнал одновременно и в полуволновом режиме, и в режиме резонатора Гельмгольца. Предполагалось, что по мере изменения геометрии горла резонатора, усиление в одном режиме будет плавно уменьшаться, а в другом режиме плавно возрастать.

До проведения экспериментов ожидалось что при установке передней крышки с отверстием в четвертьволновой резонатор, тот превратится частично в полуволновой резонатор, и, при большом диаметре отверстия в крышке, камера превратится в симбиоз двух резонаторов. При этом, в окне спектроанализатора, ожидалось появление дополнительного пика на удвоенной частоте, принадлежащего полуволновому резонатору, и, по мере уменьшения диаметра отверстия в крышке, ожидалось плавное увеличение амплитуды колебаний на фиксированной частоте резонанса полуволнового резонатора и уменьшение амплитуды на фиксированной частоте резонанса четвертьволнового резонатора.

Также, при дальнейшем уменьшении диаметра отверстия в передней крышке, ожидалось появление пика на более низкой частоте, соответствующего усилению в режиме резонатора Гельмгольца, также конструктивно представляющего собой камеру с отверстием, но функционирующему по иному механизму усиления амплитуды падающего сигнала. Частота собственных колебаний резонатора Гельмгольца должна также уменьшаться при уменьшении диаметра отверстия в передней крышке камеры, поскольку эта частота определяется не только длиной камеры, но и геометрией выходного отверстия.

До проведения экспериментов ожидалось, что при некоторых размерах отверстия в передней крышке эти три типа резонаторов могут функционировать одновременно, каждый на собственной частоте резонанса, определяемой частотой собственных колебаний. Амплитуды на частоте резонанса каждого из них станут плавно изменяться, по мере того, как одна форма камеры превращается в другую при изменении диаметра отверстия в передней крышке.

Приоритетом исследований являлось изучение постепенного превращения классического четвертьволнового акустического резонатора в резонатор Гельмгольца при уменьшении относительного диаметра входного отверстия. Также, по ходу исследования, были предприняты некоторые усилия для уточнения выражений расчёта частоты собственных колебаний акустических резонаторов, а кроме того, учёта влияния формы выходного отверстия на эту частоту.

Ровная кривая АЧХ белого шума, генерируемого компьютером, заметно искажалась динамиком, но для исследования только частотной характеристики резонатора это не имело существенного значения. Резонатор представлял собой “узкую трубу” в акустическом смысле, поскольку его радиус меньше $0,6\lambda$.

Существовало предположение, что камера с одним может работать как обыкновенный полуволновой акустический усилитель. Измерения, выполненные двумя микрофонами одновременно на противоположных стенках камеры, позволили исключить это предположение.

Для этого следовало соотнести величину масштаба изображения волны на экране и время распространения волны в камере. На рис.5 представлена картина синхронной записи колебания давления с частотой 1000Гц на противоположных стенках резонатора. При скорости распространения звуковой волны в воздухе равной 340м/с и расстоянии между крышками 0,28м, время, необходимое волне для преодоления этого расстояния, составит $0,28/340=0,0008$ с. Длительность выделенного интервала составляет 0,001с.

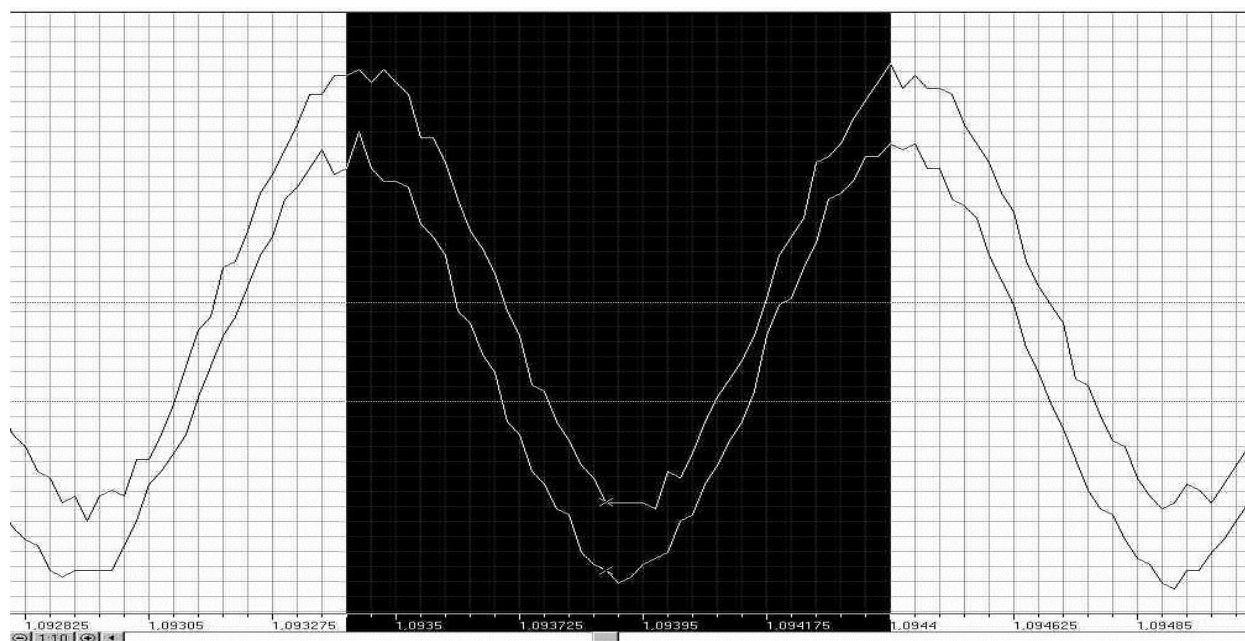


Рисунок 5. Колебания давления с частотой 1 кГц на противоположных стенках резонатора

Видно, что колебания давления на противоположных стенках камеры синхронные, и при такой частоте колебаний, между крышками, располагается почти полный период колебания. Из этого несложного эксперимента следует, что внутри камеры с горлами осуществляется колебательный процесс – изменение давления имеет периодический характер. Но волнового процесса внутри камеры нет. Отсутствует распространение волн внутри камеры и отражение их от стенок. Колебательный процесс является объёмным, внутренний объём камеры пульсирует “дышит” целиком. Эта картина напоминает работу поршневого двигателя с периодическим колебанием

давления внутри цилиндра. Причём изменение давления внутри цилиндра происходит одновременно во всех точках его объёма. А роль поршня выполняет небольшой объём жидкости, расположенный в длинном и узком горле. Считается, что жидкость в горле не успевает деформироваться и перемещается при изменении давления в камере одновременно, как единое целое. Такая схема предложена Релеем.

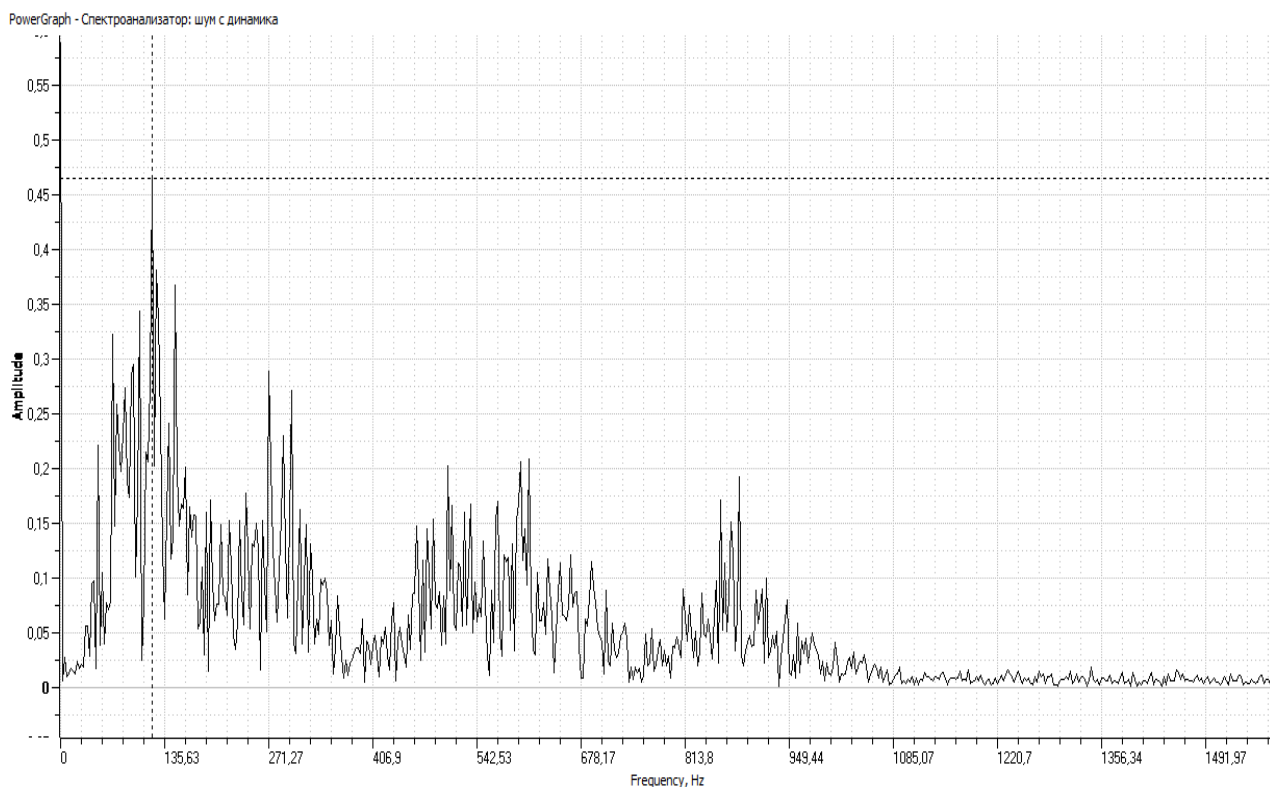


Рисунок 6. Спектр шумов с динамика

Для начала мы при помощи микрофона записали шумы с динамика. Расстояние от микрофона до источника шума было порядка 15см. То есть ровно столько же сколько от источника колебаний до горла трубы. На рис.6 мы можем увидеть спектр шумов с динамика, видно, что главный всплеск сигнала располагался на частоте 119Гц. Также заметны всплески сигнала на частотах 271 Гц, 505 Гц и 884Гц

Для вывода выражения, позволяющего получить частоту собственных колебаний столба жидкости, заключённого в камере с горлом, рассмотрим резонатор Гельмгольца, представляющий камеру с узким и длинным горлом, в виде механической колебательной системы: представляя массу жидкости, заключённую в горле, в виде тела массой m , а столб жидкости, заключённый в камере – в виде упругого элемента – пружины с жёсткостью k (рис.7), получим следующую колебательную систему.

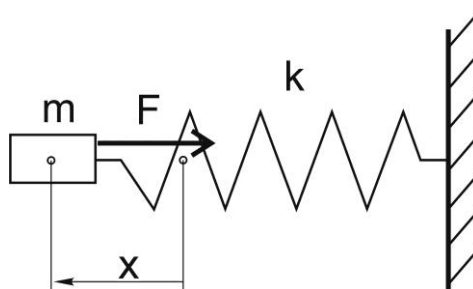


Рисунок 7. Схема механической колебательной системы из одного грузика на пружине

Возможны различные способы выведения системы из состояния равновесия.

а) можно сжать пружину и отпустить грузик в момент времени $t_0 = 0$. Если будем растягивать пружину изменится только знак у восстанавливающих сил на обратный.

б) можно резко ударить по грузику, сообщив ему скорость v_0 в момент времени $t = 0$.

Для определения частоты собственных колебаний системы начальные условия выведения её из состояния равновесия не имеют значения, поскольку частота собственных колебаний определяется лишь геометрическими параметрами системы.[10]

При отсутствии внешних сил, движение тела в системе будет определяться только жёсткостью пружины k , и уравнение сил в произвольный момент времени запишется в виде,

$$m\ddot{x} - F = 0 \text{ – уравнение движения тела,}$$

или

$$m\ddot{x} - kx = 0,$$

где x – изменение длины пружины, (в этой схеме изменение координаты x совпадает с изменением длины пружины, $x = x - x_0$, где $x_0 = 0$, соответствует положению груза в уравновешенном состоянии, когда пружина не деформирована).[11]

$$m \frac{d^2x}{dt^2} - kx = 0,$$

Частотное уравнение запишется в следующем виде,

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \frac{k}{m}x = 0,$$

где $\omega^2 = k/m$ – (коэффициент при x) характеризует циклическую частоту собственных колебаний системы.

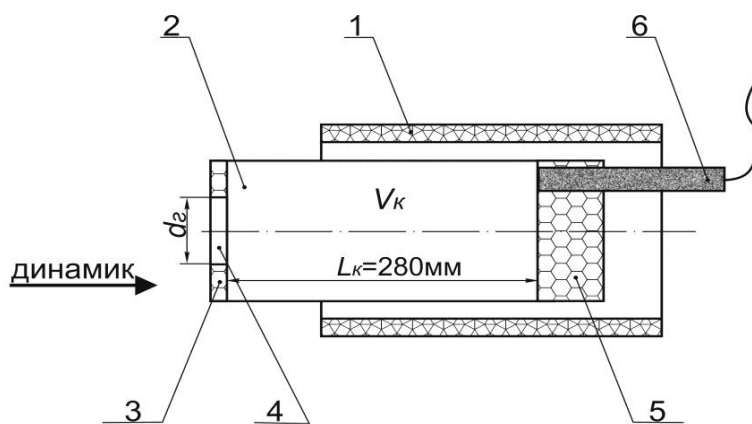
Следует выбирать направление оси x таким образом, чтобы в частотном уравнении перед переменной в первой степени стоял знак минус, иначе решением уравнения будет отрицательный корень (частота)[5].

В акустических расчётах механическая масса $m = \rho S \ell$, заменяется акустическим аналогом $m_a = \rho \ell / S$, а механическая жесткость k представляется механической податливостью $C_m = 1/k$ и заменяется акустической податливостью $C_a = V_k / \rho c^2$, где ρ – плотность жидкости в камере [$\text{кг}/\text{м}^3$], S – площадь горла [м^2], ℓ – длина горла [м], V_k – объём камеры [м^3], c – скорость звука в рабочей жидкости [$\text{м}/\text{с}$]. Циклическую частоту акустической системы выразим через параметры среды и геометрические параметры камеры резонатора,

$$\begin{aligned}\omega^2 &= \frac{k}{m} = \frac{S}{\rho \ell} \cdot \frac{\rho c^2}{V_k} = \frac{S}{\ell} \cdot \frac{c^2}{V_k}, \\ \omega &= c \sqrt{\frac{1}{V_k} \frac{S}{\ell}}, \quad f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{V_k} \left(\frac{S}{\ell}\right)} \\ f &= \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{V_k} \left(\frac{S_r}{\ell_r}\right)} \quad (4)\end{aligned}$$

Найденная f – это частота собственных колебаний акустической системы – резонатора Гельмгольца, с размерностью в герцах. Как известно резонатор

Гельмгольца - это камера с узким и длинным горлом. Частота собственных колебаний такой камеры хорошо считается по полученной выше формуле. Наши усилия были направлены на уточнение интервала изменения размеров камеры с отверстием в крышке, в котором с достаточной точностью рассчитывается её резонансная частота по этой формуле[6].



- 1 - корпус установки, 2 - резонатор Гельмгольца,
 3 - крышка передняя, 4 - горло переднее,
 5 - крышка задняя, 6 - микрофон измерительный.

Рисунок 8. Схема резонатора с отверстием в передней крышке.

В этой серии экспериментов резонатор представлял собой цилиндрическую камеру с двумя крышками: задняя была без отверстий и в ней устанавливался измерительный микрофон, передняя крышка толщиной 10мм имела центральное отверстие с острыми краями. Камера напоминала в некоторой степени и четвертьволновой резонатор, и полуволновой, и резонатор Гельмгольца[7]. Диаметр отверстия в передней крышке последовательно уменьшался от 78мм до 4,5мм. Остальные размеры камеры оставались неизменными. Задачей нашей будет получить переход в формуле между четвертьволновым и полуволновым резонатором.

Сначала была получена АЧХ четвертьволнового резонатора – цилиндрической камеры с глухим днищем. В глухом днище был установлен микрофон, который, таким образом, располагался всегда в узле давления и фиксировал максимальную амплитуду колебаний в камере. В этом случае камера длиной 280мм и диаметром 78мм устанавливалась в корпус таким

образом, что открытый торец камеры находился в одной плоскости с передним торцом корпуса. На рис.9 представлена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) отклика камеры на падающий сигнал.

Как мы можем наблюдать на рис.9, имеется один явно выраженный пик на частоте 271 Гц, и еще один пик при частоте порядка 841 Гц. Если рассмотреть амплитуду, то можно заметить, если посмотреть на рис.6 и рис.9., что мы увидим увеличение сигнала более чем в 4 раза. А второй пик по амплитуде будет иметь увеличение более чем в 2 раза. Данные по вычислению собственных частот приведены ниже в таблице 1.

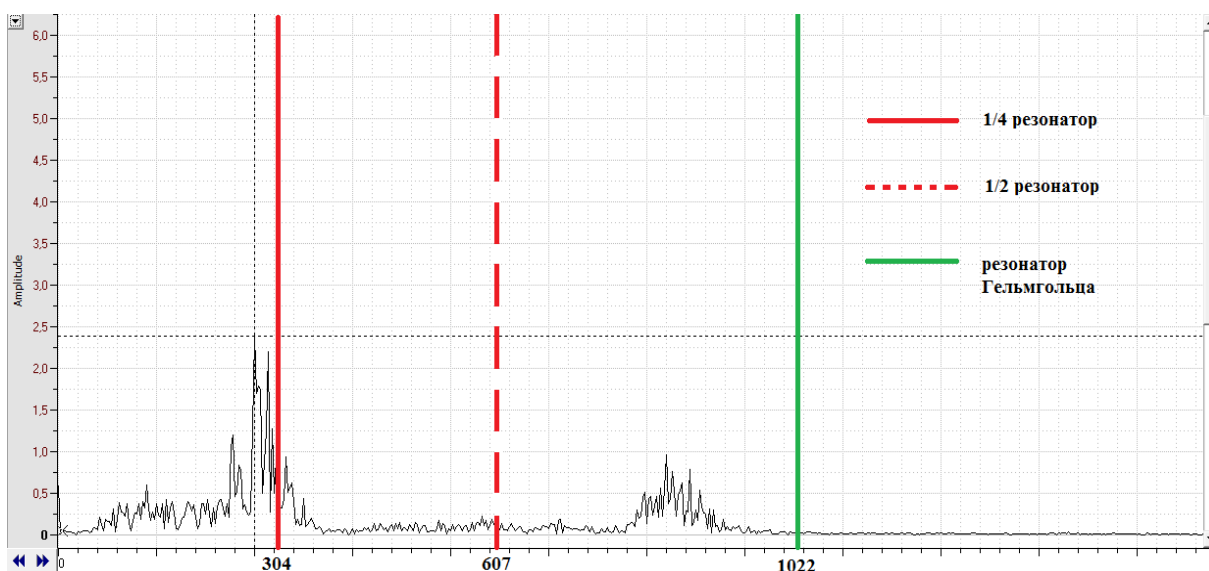


Рисунок 9. АЧХ камеры с диаметром отверстия 78мм

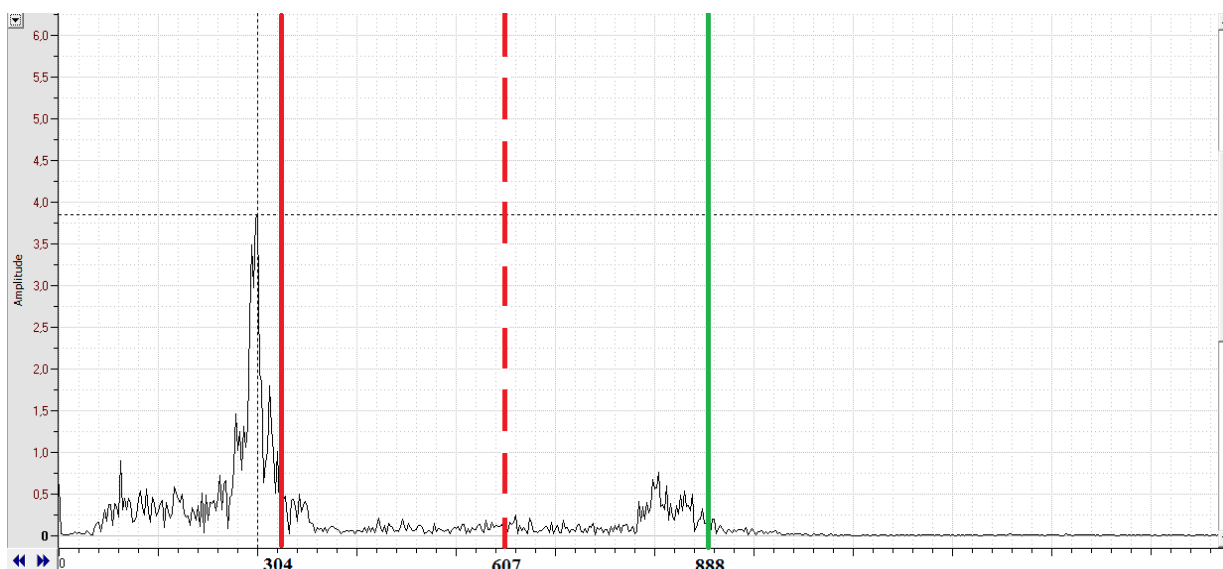


Рисунок 10. АЧХ камеры с диаметром отверстия 67,5мм

Как видно из рисунка имеется ярко выраженный пик на частоте 271 Гц, и так же мы видим второстепенный пик на частоте 819 Гц. При данной конфигурации диаметра отверстия мы замечаем, что усиление происходит еще сильнее, уже более чем в 8 раз. По сравнению с предыдущим рисунком, можно сделать вывод, что в камере с диаметром отверстия в 67,5 мм резонансные свойства более выражены и наша камера ведет себя как четвертьволновой резонатор. В дальнейшем, эти свойства с уменьшением диаметра горла должны уменьшаться, т.е. пики должны быть уже меньшей амплитуды. Все расчеты приведены в таблице 1.

Из рисунка 11 мы видим пик на частоте 255 Гц и небольшое возрастание амплитуды на частоте 795 Гц. Данные занесены в таблицу 1.

На рисунке 12 мы наблюдаем пик на частоте 228 Гц, и как можно уже заметить амплитуда стала заметно уменьшаться. Так же заметим небольшие возмущения в районе частот 700 Гц, которые мы уже постепенно можем не брать во внимание, потому что замечено, при уменьшении отверстия они очень резко падают по величине на фоне всего сигнала.

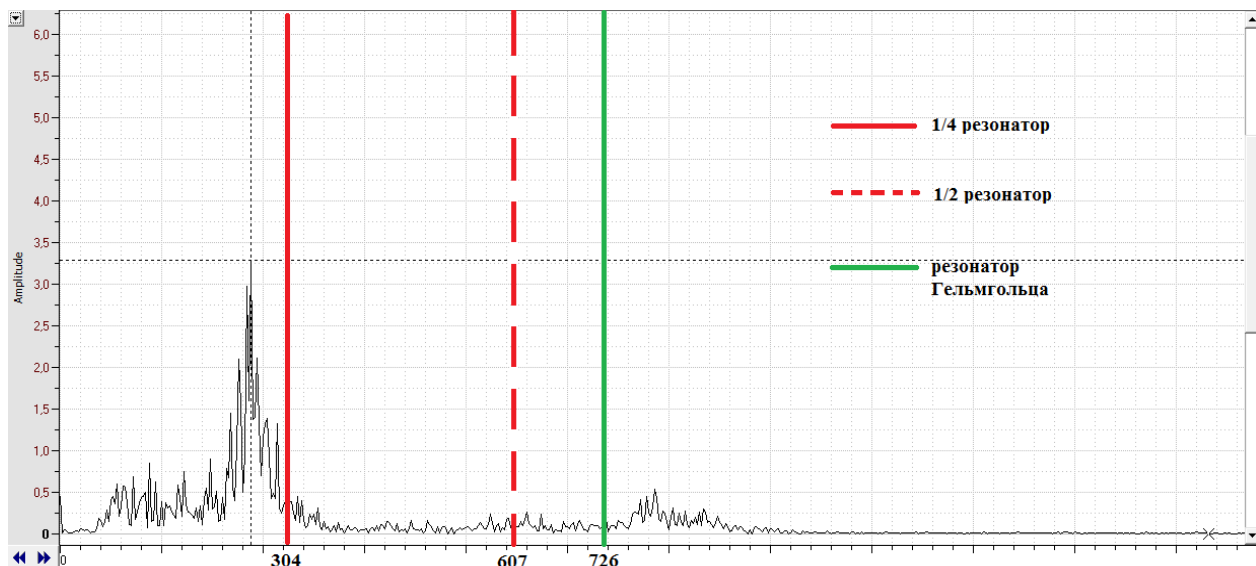


Рисунок 11. АЧХ камеры с диаметром отверстия 55мм

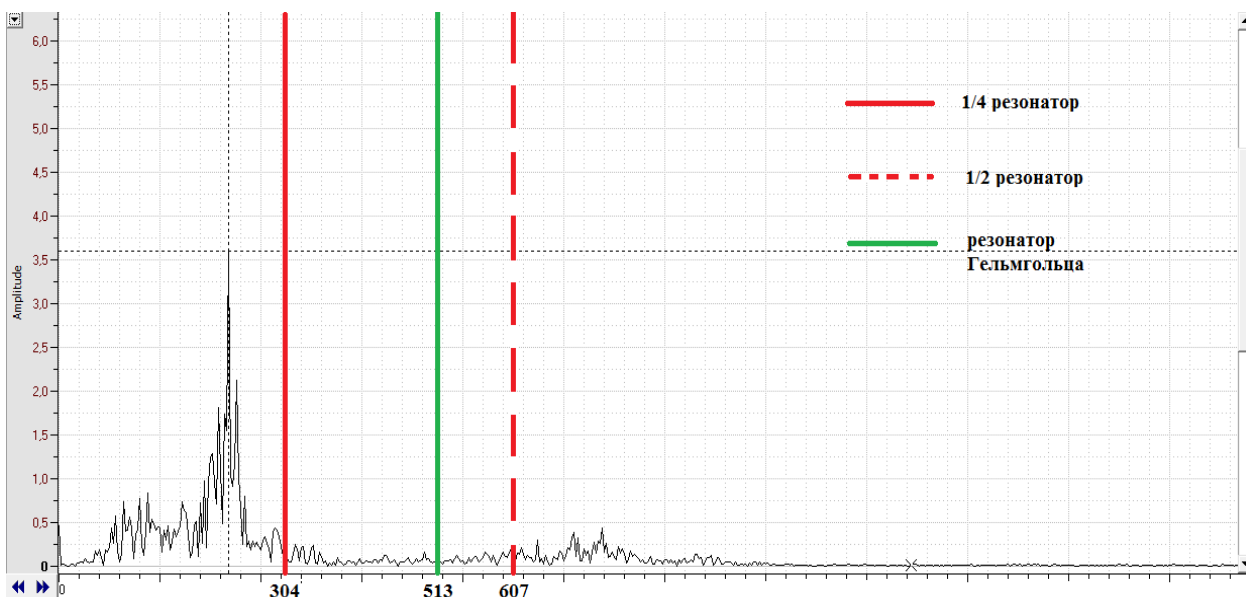


Рисунок 12. АЧХ камеры с диаметром отверстия 39 мм

Из рисунка 13 мы видим, что пик наблюдается 205 Гц, так же мы видим, что в данном примере, при данном диаметре отверстия имеется небольшой пик при частоте 691 Гц. Тут ,стоит задуматься о том ,что наш четвертьволновой резонатор постепенном уменьшении сечения отверстия стал превращаться в полуволновой. Это можно объяснить лишь потом, когда мы рассмотрим все диаметры. И конечно будут сделаны соответствующие выводы.

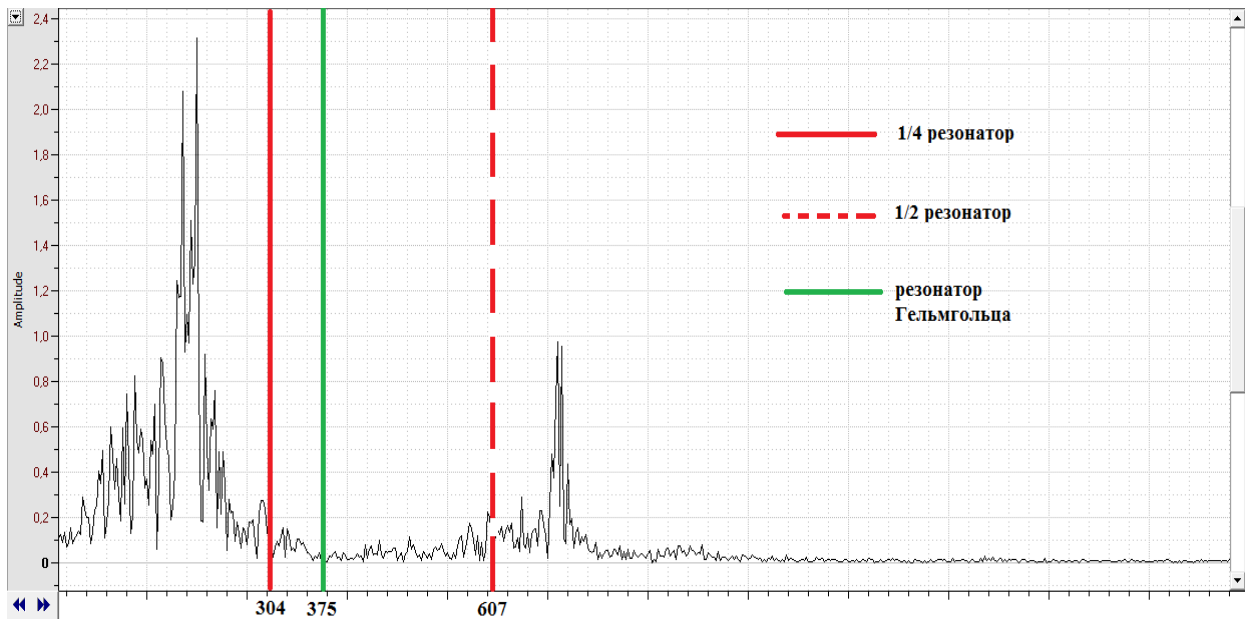


Рисунок 13. АЧХ камеры с диаметром отверстия 28,5 мм

На рисунке 14 мы можем наблюдать максимум на частоте 157 Гц. Так же как и в предыдущем случае, видим небольшие возмущения на частоте около 690 Гц.

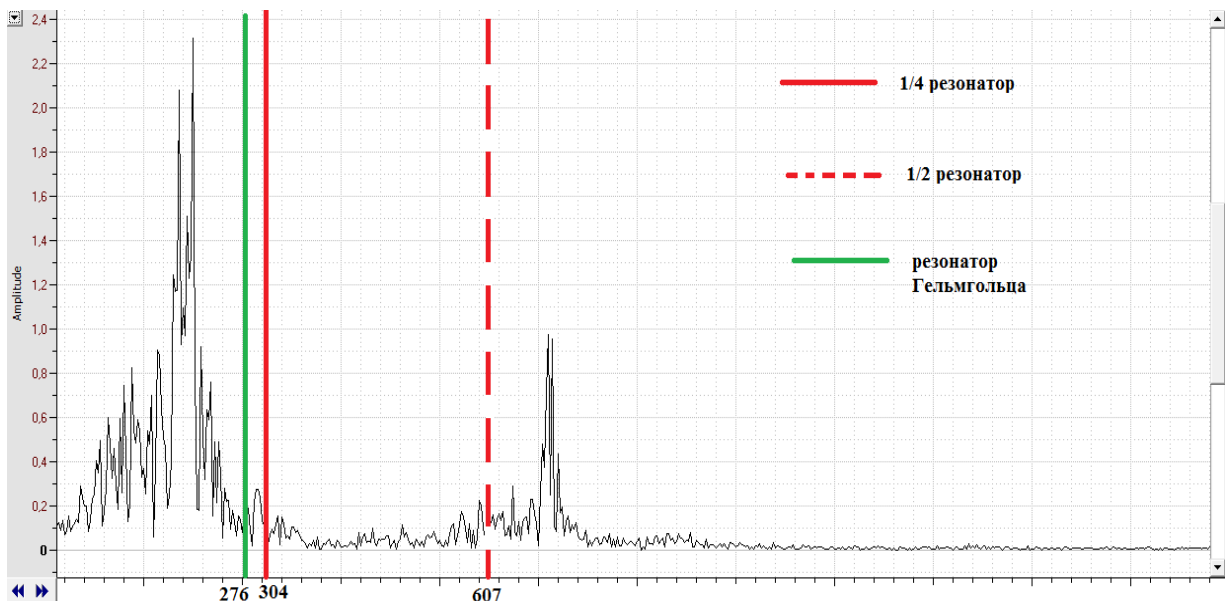


Рисунок 14. АЧХ камеры с диаметром отверстия 21 мм.

На рисунке 15 мы наблюдаем значительное уменьшение амплитуды. Пик наблюдается на частоте 111 Гц, не столь значительные возмущения мы видим на частотах порядка 649 Гц. И для того чтобы приступить к обработке

результатов, нам необходимо рассмотреть еще два варианта отверстий с диаметром 8мм и 4,5мм. На рисунках 16 и 17 они будут представлены.

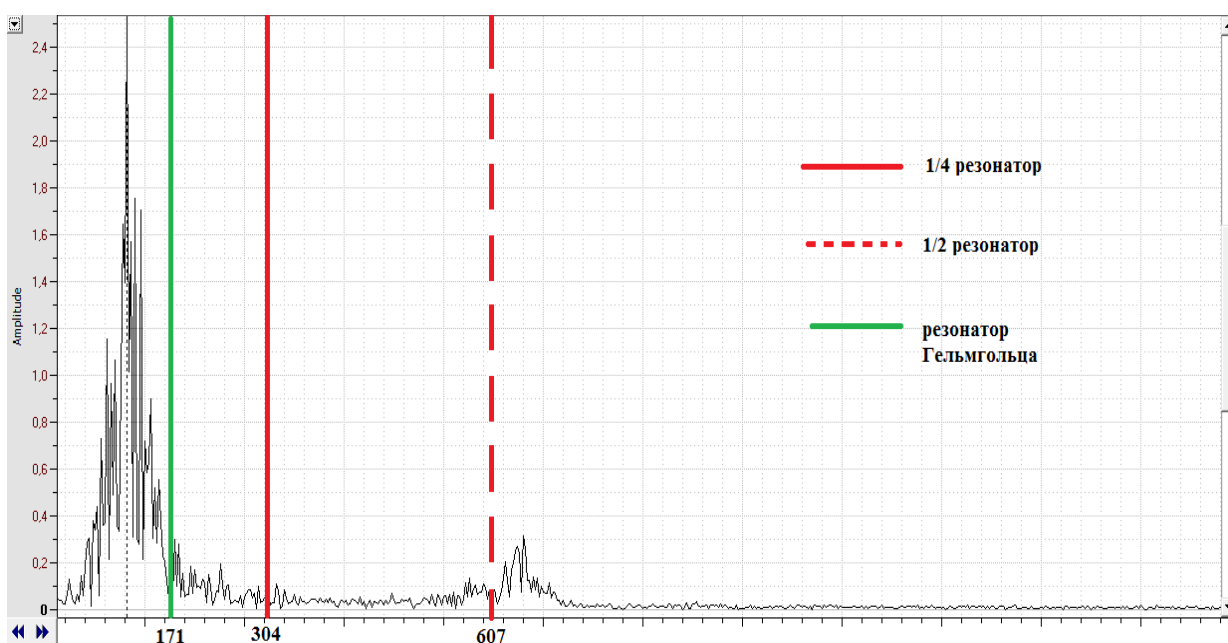


Рисунок 15. АЧХ камеры с диаметром отверстия 13 мм

У резонатора с диаметром отверстия 8 мм мы видим два пика, которые очень ярко выражены (рисунок 16). Частота первого порядка 86 Гц, а второго около 642 Гц.

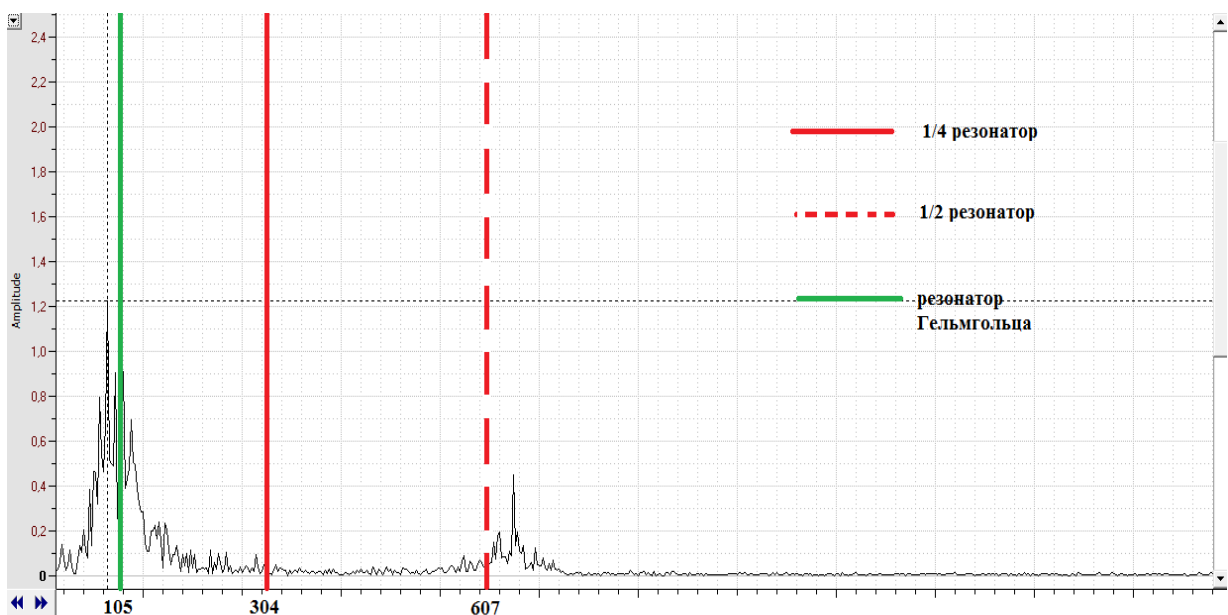


Рисунок 16. АЧХ камеры с диаметром отверстия 8 мм

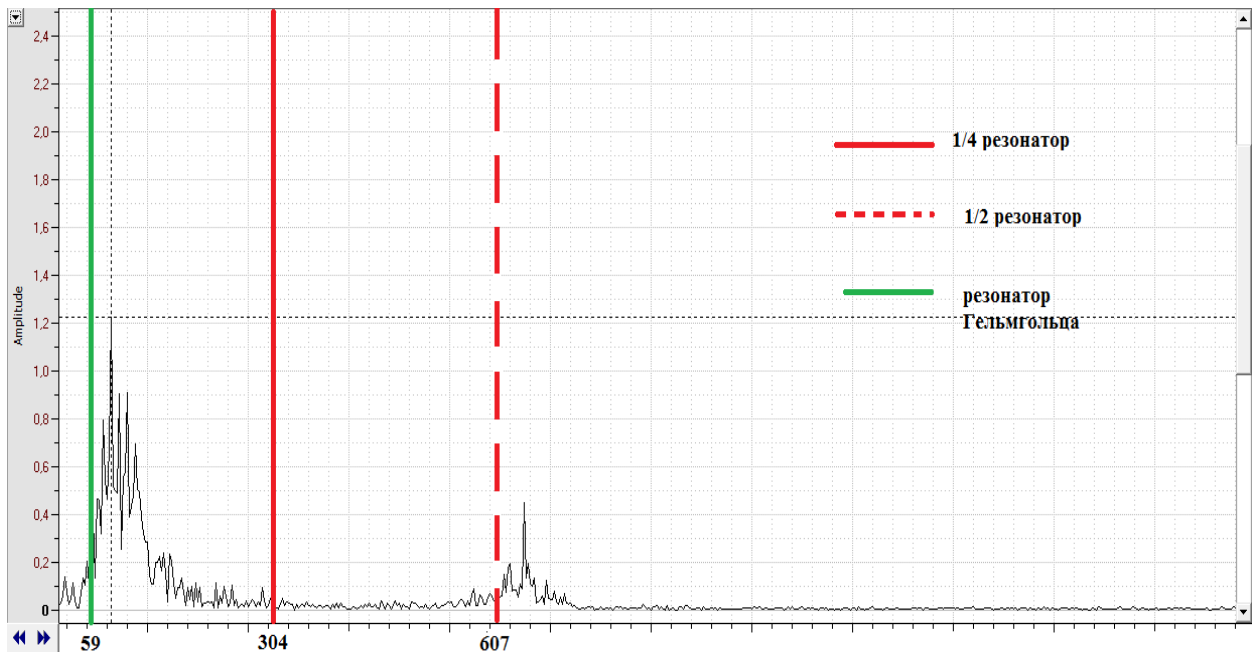


Рисунок 17. АЧХ камеры с диаметром отверстия 4,5мм

На рисунке 17 мы также имеем, как и на 16, очень выраженные пики. Основной пик соответствует частоте 84 Гц, а малый 643 Гц. Как видно, амплитуда очень сильно упала. Тем самым, усилительные свойства резонатора с уменьшением диаметра отверстия стали заметно ухудшаться. Теперь нам нужно провести расчеты, для различных формул – для полуволнового, четвертьволнового и общего случая – резонатора Гельмгольца.

Как известно, частота собственных колебаний резонатора Гельмгольца с длинным тонким горлом определяется из выражения (4).

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{V_k} \frac{s_\Gamma}{\ell_\Gamma}} \quad (4)$$

где V_k – объём камеры резонатора [м^3], s_Γ – площадь поперечного сечения горла [м^2], ℓ_Γ – длина горла [м]. Объём камеры и длина горла оставались неизменными в ходе серии экспериментов.

$$V_k = L_k \cdot S_k = 0,28 \cdot 3,14 \cdot 0,078^2 / 4 = 0,28 \cdot 0,004776 = 0,00134 \text{ м}^3.$$

Известно, что данное выражение применимо лишь в том случае, если горло резонатора представляет собой длинную и тонкую трубку. В данной конструкции всё как раз наоборот: горло имеет небольшую длину и большой (относительно длины) диаметр отверстия.

В представленной ниже таблице 1 можно сравнить экспериментальные значения частоты резонанса f_p , представленной конструкции резонатора Гельмгольца, с результатами расчёта частоты собственных колебаний f_c исследуемого резонатора, выполненных по приведённому выше выражению (4), а также с учётом поправок, предложенных в работе [12].

Таблица 1 Экспериментальные и расчетные частоты собственных колебаний

$d(\text{мм})$	78	67,5	55	39	28,5	21	13	8	4,5
$S_2[\text{см}^2]$	47,76	35,77	23,7	11,9	6,4	3,46	1,33	0,5	0,16
$\delta \cdot 10^3$	66	57,4	47	33,2	24,2	17,8	10,5	7,07	3,84
f_p (Гц)	271	271	255	228	203	157	111	86	84
f_c (Гц)	1022	888	726	513	375	276	171	105	59
f_c (Гц)	304	304	304	304	304	304	304	304	304
f_c (Гц)	607	607	607	607	607	607	607	607	607

В строке 1 представлены размеры диаметра отверстия трубы, которое изменялось по ходу эксперимента от 78 до 4,5 мм.

В строке 2 представлена вычисленная площадь сечения входного отверстия.

В строке 3 наблюдаем концевую поправку для различных диаметров отверстий.

В строке 4 представлены экспериментально измеренные величины частоты резонанса цилиндрической камеры $D_k=78\text{мм}$ и $L_k=280\text{мм}$ с центральным отверстием, длина которого оставалась неизменной – 10мм, и диаметр которого указан в верхней строке. Первый столбец с цифрами соответствует камере без передней крышки, т.е. четвертьволновому резонатору.

В строке 5 представлены результаты расчёта частоты собственных колебаний камеры по формуле (3а), так называемого четвертьволнового резонатора.

В строке 6 представлены результаты расчёта частоты собственных колебаний камеры по формуле (3б), так называемого полуволнового резонатора.

$\delta \approx 0,96\sqrt{S_2}$, предложенная в работе [8], где S_2 – площадь горла. В работе [13] предложен коэффициент 0,8 вместо 0,96.

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{V_k} \frac{S_r}{\ell_r + \delta}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{V_k} \frac{S_r}{0,01 + \delta}} \quad (5)$$

Вызывает удивление недостаточное внимание в [12] к длине отверстия.

Прослеживается уменьшение расхождения между величиной частоты, полученной из выражения (4), и экспериментальными измерениями при уменьшении диаметра отверстия в крышке камеры. Однако, становится также очевидно, что удовлетворительную точность расчёта это выражение обеспечит лишь при условии, что площадь сечения горла не больше 1% от площади сечения камеры, хотя обычно критерием применимости этого выражения принимают соотношение объёмов жидкости, заключённой внутри камеры и в горле. Также необходимо, чтобы длина горла была не менее 3-х калибров (соотношение длины к диаметру).

Выражения для концевой поправки δ , предложенные в работе [12], позволяют достаточно точно подсчитать частоту собственных колебаний резонатора Гельмгольца до определённых пределов. При размерах горла $\ell_2/d_2 > 1$ введение концевой поправки позволяет достаточно точно рассчитать частоту собственных колебаний резонатора по формуле (4). При размерах горла $0,5 < \ell_2/d_2 < 1$ расчёт даёт небольшое превышение частоты собственных колебаний резонатора над измеренной частотой резонанса. При размерах горла резонатора $\ell_2/d_2 < 0,5$, т.е. если диаметр отверстия больше его удвоенной длины,

расчёт по формуле (4), даже с использованием концевой поправки δ , даёт всё большее превышение частоты собственных колебаний резонатора над фактической частотой резонанса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы:

- разработана установка для проведения эксперимента. Установка моделировала скважину;
- исследованы методы воздействия на ПЗС (призабойная зона скважины). Рассмотрены акустические методы воздействия на пласт;
- рассчитаны различные типы резонаторов. С изменением диаметра горла мы переходим от одной конфигурации к другой, т.е. свойства системы переходят от одного вида резонатора к другому. В нашем случае при уменьшении диаметра отверстия установлено, что свойства четвертьволнового резонатора убывали, а полуволнового наоборот, стали стремиться к значениям, полученным теоретическим путем;
- экспериментально найдены поправки, в зависимости от конфигурации резонатора. Эти поправки существенны при больших диаметрах отверстия. Когда свойства резонатора стремятся к модели полуволнового резонатора их можно вовсе не учитывать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов О.Л., Симкин Э.М., Чилингар Дж. Физические основы вибрационного и акустического воздействия на нефтегазовые пласты. – М.: Мир, 2001. – 260 с.
2. Кузнецов О.Л., Ефимова С.А. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. – М.: Недра, 1983. – 192 с.
3. Красильников В.А. Введение в акустику: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ, 1992. – 152 с.
4. Алешкевич В.А., Деденко Л.Г., Караваев В.А. Колебания и волны: Лекции. – М.: Физический факультет МГУ, 2001. – 143 с.
5. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1968. – 940 с.
6. Chanaud R.C. Effects of geometry on the resonance frequency of Helmholtz Resonators: Part 1 // Journal of Sound and Vibration. 1994. 178 (3), pp. 337-348.
7. Ильгамов М.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Репин В.Б. Нелинейные колебания газа в трубе. Обзор исследований по механике сплошной среды. Казань: ИММ КНЦ РАН. 2000. – 35 с.
8. Исакович М.А. Общая акустика: Учебное пособие. – М.: Наука. 1973. – 496 с.
9. Комкин А.И., Миронов М.А., Юдин С.И. О присоединённой длине отверстий // Акустический журнал. 2012. 58, 6. С.677-682.
10. Комкин А.И., Миронов М.А., Юдин С.И. Исследование акустических характеристик резонатора Гельмгольца // Доклад на XXVII сессии акустического общества. С-Петербург, 16-18 апреля 2014 г. – С. 1-7. URL: <http://rao.akin.ru/Rao/sess27/%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BA%D0%B8%D0%BD.pdf> (дата обращения: 20.05.2015).
11. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р.. Курс теоретической механики. В 2 т. том 2. – М.: Наука, 1979. – 544 с.
12. Ingard U. On the theory and design of acoustic resonators // J.Acoust. Soc. Am. 1953. v. 25, № 6, pp.1037-1061.

13. Морз Ф. Колебания и звук / перевод с англ. под ред С.Н. Ржевкина. – М.:
Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры. 1949. – 497 с.