

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ**  
**КАФЕДРА РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**  
Специальность: 03.03.03 — радиоп физика

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

(Бакалаврская работа)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКОГО  
РЕЗОНАТОРА**

Работа завершена:

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г. \_\_\_\_\_ Ветошко Р.А.

Работа допущена к защите:

Научный руководитель

ст. преподаватель, к.т.н.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г. \_\_\_\_\_ Марфин Е.А.

Заведующий кафедрой,

д.ф.-м.н., профессор

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г. \_\_\_\_\_ Овчинников М.Н.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	5
1.1 Общие сведения об упругих колебаниях.....	5
1.2 Акустические резонаторы .....	9
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ .....	20
2.1 Методика проведения эксперимента. Оценка погрешности измерения....	20
2.2 Резонатор со сферической камерой .....	23
2.3 Резонатор с кубической камерой.....	27
2.4 Резонатор с цилиндрической камерой. ....	32
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	41
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	43
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	45
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	48

## ВВЕДЕНИЕ

Явление резонанса проявляется во многих сферы нашей деятельности. Оно встречается во всех колебательных системах: в механике (маятник, колебание струн), электрических цепях, акустике. Для полезных резонансов всегда пытаются найти применение (радиоприемники), вредные же всегда стараются погасить.

Акустический резонатор (или резонатор Гельмгольца) представляет собой одну из простейших колебательных систем. Он выполнен в виде сферического сосуда с открытым горлом. В качестве примеров применения на практике резонатора Гельмгольца можно привести струнные музыкальные инструменты полые корпуса, которых позволяют усиливать колебания, исходящие от струн. По то кому же принципу работают фазоинверторы в корпусах акустических систем. Также он может быть применен в конструкции различных излучателей колебаний. Примечательно, что помимо усиления акустический резонатор может ослаблять колебания на резонансных частотах. Данное свойство применимо в следующих отраслях: в шумовой обработке автомобильных салонов для уменьшения резонансов салона, в качестве элементов поглощения шумов в студиях звукозаписи, в автомобильных глушителях двигателей внутреннего сгорания. Резонатор Гельмгольца является одним из наиболее распространенных элементов глушения шумов, поэтому очень важно точно рассчитать его акустические параметры при его проектировании.

При использовании формулы для расчета собственной частоты возникают несоответствия между теоретическими и экспериментальными значениями собственных частот. Данные несоответствия устраняют, вводя некую поправку на параметры резонатора.

Целью данной работы являлось исследование зависимости частоты резонатора Гельмгольца от его геометрических параметров и поиск выражения для поправки в формуле для собственной частоты для разных конфигураций

резонатора. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- разработка лабораторной установки;
- создание физических моделей акустических резонаторов;
- проведение эксперимента;
- исследование влияния геометрических характеристик резонатора на его параметры.

# ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1.1 Общие сведения об упругих колебаниях

*Колебания* – это движения или процессы, обладающие свойством временной повторяемости. Колебательные системы можно охарактеризовать каким-нибудь параметром, функция отклонения которого  $g(x, y, z, t)$  от равновесного положения имеет временную и координатную зависимость. Физическая природа колебательных процессов очень разнообразна. В механике примерами колебательных систем являются: пружинный маятник, работа поршней в двигателях внутреннего сгорания, волны на поверхности воды, землетрясения и пр. В электромагнетизме: свет, колебания напряжения и тока в электрических цепях и др. [13].

Механические колебания совершаются либо частицами среды, в которой распространяется возмущение, либо точечной массой. Функциональная зависимость  $g(x, y, z, t)$ , может описывать изменения различных физических параметров рассматриваемой колебательной системы: координаты, скорости (линейной, угловой), деформации, давления и пр. [13].

В цепях переменного тока колеблющейся величиной могут быть текущий через катушку индуктивности ток, напряжение, заряд на обкладках конденсатора. При движении электромагнитных возмущений в различных средах колеблются вектора напряженности  $\vec{E}(x, y, z, t)$  и индукции  $\vec{B}(x, y, z, t)$  электромагнитного поля [13].

*Периодическими* называют колебания, в которых значения изменяющихся во времени величин, повторяются через равные промежутки времени. *Периодом колебаний*  $T$  называется наименьший промежуток времени, в течение которого происходит одно полное колебание. Величина, обратная к периоду колебания, называется *частотой колебания*  $\nu$ . Она представляет собой число полных колебаний, совершенных в единицу времени [13]:

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (1.1)$$

Временная зависимость периодической физической величины  $A(t)$  имеет вид:

$$A = A_0 + y(t), \quad (1.2)$$

где  $A_0 = \text{const}$ , а  $y(t)$  является периодической функцией времени:

$$y(t + T) = y(t). \quad (1.3)$$

Для периодических функций характерно то, что их значения повторяются через любое целое число периодов:

$$y(t + nT) = y(t), n \in Z. \quad (1.4)$$

*Волной* называется распространение колебаний в среде. Частицы среды данной среды не переносятся волной, а только лишь колеблются возле положения своего равновесия. *Продольными* называют волны, колебание частиц среды в которых идет вдоль распространения волны. В *поперечных* волнах колебание частиц среды происходит в направлениях, ортогональных направлению распространения волны. Поперечные волны возможны в средах, обладающих сопротивлением к деформации сдвига. Из-за этого в жидкостях и газах возможны только продольные волны. В твердых телах могут возникать оба вида волн. *Длиной волны*  $\lambda$  называется наименьшее расстояние между частицами, колеблющимися в одной фазе. Длина волны равна пути, пройденному волной за период колебания  $T$  со скоростью  $v$  [15]:

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}. \quad (1.5)$$

*Фронт волны* – геометрическое место точек (ГМТ) до которых дошло колебание в момент времени  $t$ . Фронт волны является поверхностью,

отделяющей часть пространства, вовлеченное в колебание, от области, до которой колебания еще не дошли. *Волновая поверхность* – ГМТ, колеблющихся в одинаковой фазе. Ее можно провести через любую точку пространства, вовлеченную в волновой процесс. Волновых поверхностей существует бесконечно много, в отличие от волнового фронта, который в каждый момент времени только один. Волновые поверхности остаются неподвижными (они проходят через положения равновесия частиц, колеблющихся в одинаковой фазе). Волновой фронт все время перемещается. Волновые поверхности могут быть любой формы [13].

В простейших случаях они имеют форму плоскости или сферы. Соответственно волна в этих случаях называется плоской или сферической. В плоской волне волновые поверхности представляют собой систему параллельных друг другу плоскостей, в сферической волне систему концентрических сфер.

*Вынужденными* называются колебания, возникающие за счет действия внешней периодической силы. Воздействие вынуждающей силы особенно заметно при некоторой частоте внешнего возмущения, при котором амплитуда колебаний системы принимает максимальное значение. Это явление называется *резонансом*, а частота, на которой наблюдается резонанс, называется *резонансной частотой* [13].

*Стоячие волны* являются результатом суммирования двух волн, движущихся в противоположных направлениях. Стоячие волны обладают следующими свойствами: их частоты одинаковы, амплитуды описываются одинаковыми функциями координат. В случае поперечных волн необходима также одинаковая поляризация обеих волн. Возникновение стоячих волн является частным случаем явления интерференции волн. Уравнение плоской продольной стоячей волны при наложении прямой волны  $\Phi_1 = a \sin(\omega t - kx + \alpha_1)$  и обратной волны  $\Phi_2 = a \sin(\omega t + kx + \alpha_2)$ , имеет вид [15]:

$$\Phi = 2a \cos\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} - kx\right) \sin\left(\omega t + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right). \quad (1.6)$$

Амплитуда стоячей волны не имеет зависимости от времени, а является только функцией координаты [15]:

$$A(x) = 2a \left| \cos\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} - kx\right) \right| \quad (1.7)$$

Точки, где  $A(x)=0$ , называются *узлами* стоячей волны, а точки, для которых амплитуда волны принимает максимальное значение  $A(x)=2a$ , называются *пучностями* стоячей волны. Условия для узлов и пучностей [15]:

$$\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} - kx = (2m + 1) \frac{\pi}{2}, m \in Z - \text{условие для узлов} \quad (1.8)$$

$$\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} - kx = 2m \frac{\pi}{2}, m \in Z - \text{условие для пучностей} \quad (1.9)$$

Для стоячих волн длиной волны является расстояние между соседними узлами либо пучностями данной волны [15]:

$$\lambda_{\text{ст}} = \frac{\pi}{k} = \frac{\lambda_{\text{бег}}}{2}. \quad (1.10)$$

Расстояние между соседними узлами и пучностями равно [15]:

$$\frac{\lambda_{\text{ст}}}{2} = \frac{\lambda_{\text{бег}}}{4}. \quad (1.11)$$



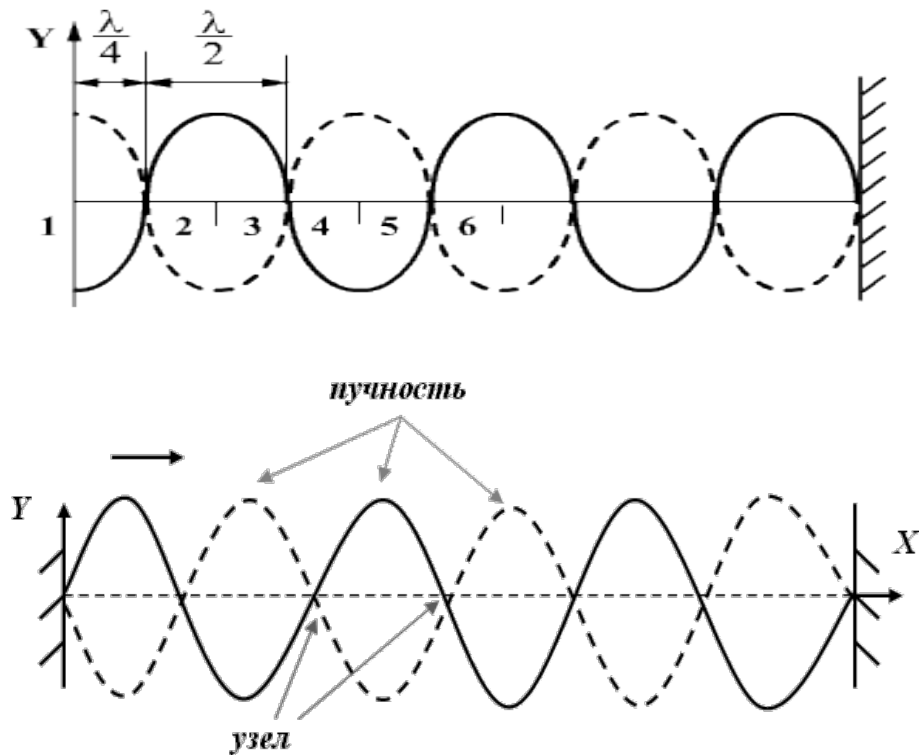


Рис. 1.1. Стоячие волны

## 1.2 Акустические резонаторы

Если газ или жидкость находится в некотором сосуде, тогда резонансные частоты принимают ряд определенных дискретных значений, называемых собственными частотами. В этом случае в объеме возникает сложная система стоячих волн, на которую оказывают воздействие размер и геометрия сосуда. Для сосуда с газом в форме цилиндра длиной  $l$  есть следующие выражения. Если оба конца трубы закрыты или открыты, то имеет место выражение [15]:

$$v = \frac{mc}{2l} \quad (1.12)$$

если один конец трубы закрыт, а другой открыт, то частота равна:

$$v = (2m - 1) \frac{c}{4l} \quad (1.13)$$

( $m=1, 2, \dots$ ,  $c$  – фазовая скорость волн в среде). Узлы скоростей молекул газа и пучности давления расположены, а у открытых концов находятся узлы давления и пучности скорости. Данные условия написаны для труб при отсутствии утечки энергии через концы трубы, которые выполняются, если радиус трубы  $R \ll \lambda$  ( $\lambda$  – длина волны). В общем случае для трубы, открытой с обоих концов [15]:

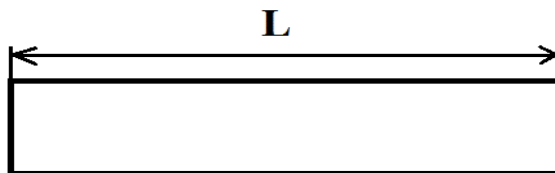
$$v = \frac{mc}{2(l + aR)} \quad (1.14)$$

и с одного конца:

$$v = \frac{(2m - 1)c}{4(l + aR)} \quad (1.15)$$

где ( $m=1, 2, \dots$ ),  $a = 0,63$ , если на открытых концах трубы нет фланцев (плоская деталь квадратной или круглой формы, присоединенная к трубе) и  $a = 0,89$ , если есть фланцы [15].

Одним из вариантов акустического резонатора может послужить органная труба, которая представляет собой четвертьволновой резонатор (рис.1.2). Из набора собственных частот сильнее всего выражена первая мода колебаний. В соответствии с этим длина трубы равна:  $l = \frac{c}{4f}$ .



*Рис. 1.2. Органная труба как пример акустического резонатора*

Например, для настройки на частоту 30 Гц длина органной трубы составит 2,8 м. Этим объясняются огромные размеры церковных органов.

Для выделения конкретных компонент из сложного гармонического колебания используется резонатор, обладающий единственной или набором собственных частот (спектральный анализ сложных звуков, создание музыкальных инструментов, конструирование узкополосных звуковых приемников и др.). Примером такой системы, обладающей всего лишь одной собственной частотой, может служить сферический сосуд с открытым горлом, называемый резонатором Гельмгольца (рис.1.3).

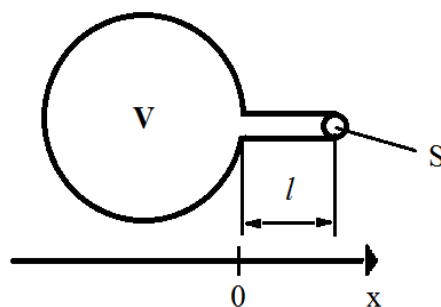


Рис. 1.3. Резонатор Гельмгольца

Воздух в открытом горле сферического сосуда является объектом, совершающим колебания. При смещении массы воздуха в сторону камеры объемом  $V$ , воздух в камере сжимается и возникает избыточное давление, силы которого играют роль возвращающей силы. Площадь поперечного сечения открытого горла равна  $S$ , а длина горла равна  $l$ . Масса колеблющегося воздушного столба равна  $m = \rho_0 l S$ , где  $\rho_0$  - плотность невозмущенного воздуха. При смещении воздуха массой  $m$  на расстояние  $x \ll l$ , плотность воздуха  $\rho$  изменяется на величину  $\delta\rho$  удовлетворяющую равенству [7, с.109]:

$$\frac{\delta\rho}{\rho_0} = \frac{-Sx}{V}. \quad (1.16)$$

Избыточное давление  $\delta p$  [7, с.98] равно:

$$\delta p = c^2 \delta \rho = -\frac{\rho_0 c^2 S}{V} x. \quad (1.17)$$

Уравнение описывающие движение массы воздуха под действием сил избыточного давления имеет вид:

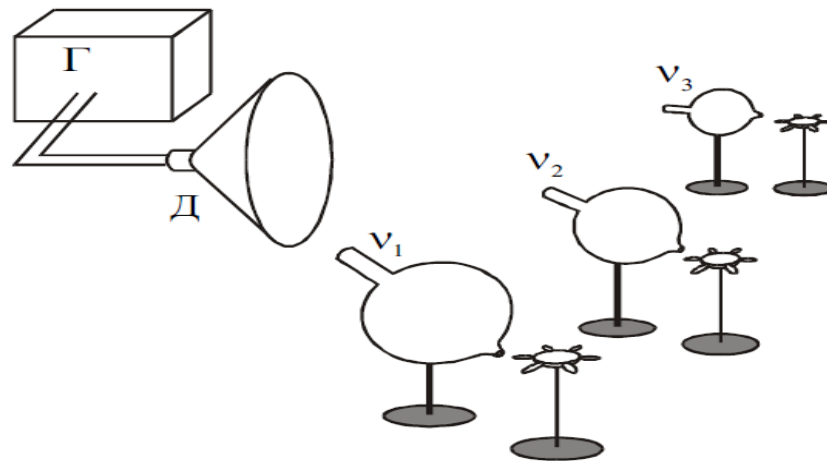
$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \delta p S \quad (1.18)$$

$$\rho_0 S l \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{\rho_0 c^2 S^2}{V} x. \quad (1.19)$$

Отсюда можно получить собственную частоту резонатора Гельмгольца:

$$\omega_0 = c \sqrt{\frac{S}{Vl}}. \quad (1.20)$$

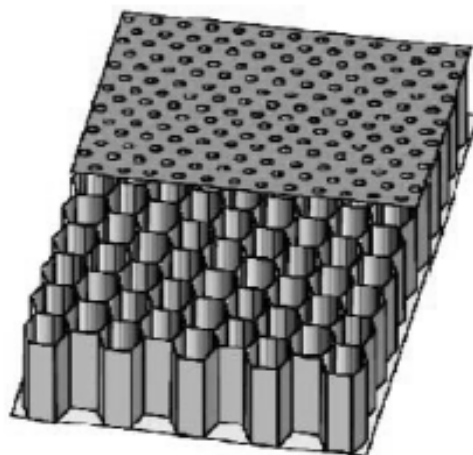
Для наглядного представления зависимости резонансной частоты от параметров резонатора служит следующий опыт [7, с. 110] (рис. 1.4). Напротив динамика (Д) расположено несколько резонаторов с разными размерами. Соответственно собственные частоты данных резонаторов также различны. Динамик подключен к звуковому генератору (Г). Он является источником акустической волны, играющей роль гармонической возбуждающей силы. При совпадении частоты сигнала  $\omega$  с собственными частотами резонатора давление воздуха в них будет колебаться с максимальной амплитудой. Струи воздуха, исходящие из задних отверстий резонаторов, фиксируются вращением вертушек, установленных за каждым резонатором. Сначала начнет вращаться вертушка у большого, далее у среднего, а в конце у маленького резонатора, обладающего большей резонансной частотой, чем у других резонаторов.



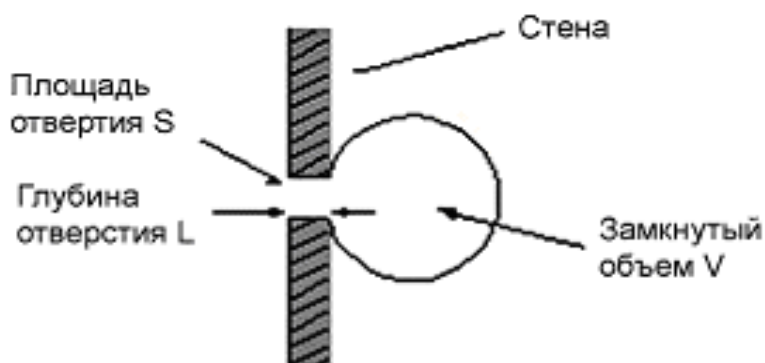
*Рис.1.4. Опыт по демонстрации зависимости резонансной частоты от размеров резонатора [7, с. 110]*

Принцип работы акустических резонаторов применяется в музыкальных инструментах, автомобильных глушителях двигателей внутреннего сгорания, фазоинверторах в корпусах акустических систем, при шумовой обработке жилых помещений и студий звукозаписи. Одной из областей применения акустических резонаторов является уменьшение уровня шума, излучаемого из воздуховодов систем вентиляции или из выхлопных труб двигателей внутреннего сгорания [16]. Использование звукопоглощающих конструкций резонансного типа (ЗПК) при акустической обработке помещений (театры, звукозаписывающие студии, конференц-залы) является одним из способов снижения уровня шума в архитектурной акустике [16]. ЗПК резонансного типа представляет собой панель, в которой располагаются небольшие звукопоглощающие ячейки, схожие по геометрии и работающие по принципу акустического резонатора (рис.1.5).

Также при обработке помещений от звуковых отражений, например, концертные залы, используют звукопоглощающие конструкции, представляющие собой акустический резонатор, вмонтированный в стену, соединенный небольшим отверстием с внешним пространством [19] (рис.1.6).



*Рис. 1.5. Пример однослойной ЗПК резонансного типа [16]*



*Рис. 1.6. Пример ЗПК на основе резонатора Гельмгольца, вмонтированного в стену [19]*

При заполнении полости резонатора демпфирующим материалом эффективность шумопоглощения с помощью акустического резонатора станет меньше на собственной частоте резонатора, однако поглощение шумов будет происходить на более широком частотном диапазоне (рис. 1.7).

Помимо звукопоглощения, резонатор Гельмгольца может использоваться в других прикладных целях. Так, например, в работе [19] предлагается использование резонатора Гельмгольца для измерения объемов твердых и жидких веществ. Когда объект с объемом  $V_a$  помещается в резонатор, это уменьшает объем его полости.

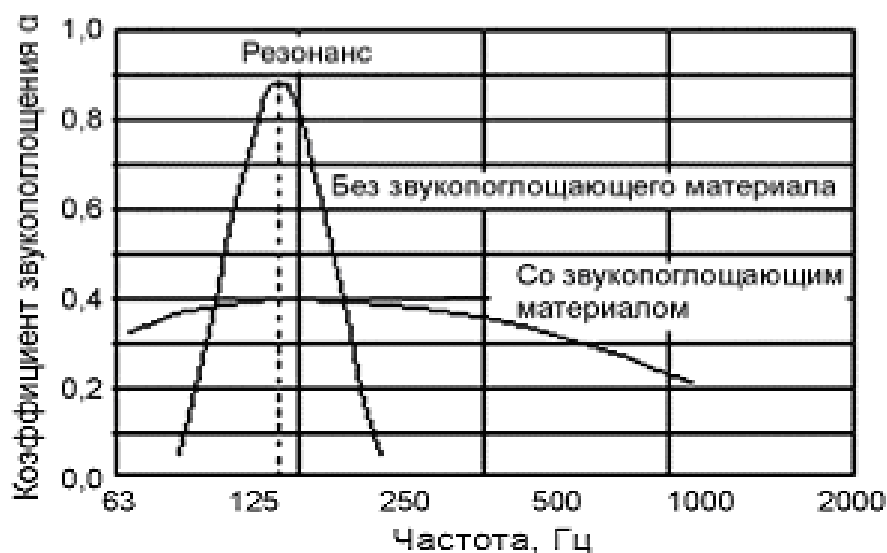


Рис. 1.7. Зависимость коэффициента поглощения для резонатора со звукопоглощающим материалом и без него [19]

Уравнение (1.20) можно применить к этой ситуации, заменив объем резонатора  $V$  на  $(V - V_a)$ . После перегруппировки объем  $V_a$  выражается через резонансную частоту системы:

$$V_a = V - \frac{S}{l \left( \frac{2\pi f}{c} \right)^2} \quad (1.21)$$

Следовательно, в принципе, измеренная частота может быть использована для определения объема объекта, помещенного в резонатор с известными физическими размерами.

Таким образом, изучение процессов, происходящих в резонаторе, и определение значимых факторов, позволяющих более точно настроить резонатор на нужную частоту работы, является одним из важных этапов в проектировании эффективных ЗПК. Поэтому очень важно точно рассчитать собственную частоту акустического резонатора.

При рассмотрении резонатора считается, что вся масса сосредоточена в горле, т.е. колебание давления сосредоточено только в объеме горла. Это

предположение верно для длинного горла, когда длина горла много больше его диаметра. Проведенные экспериментальные исследования показали, что собственная частота резонатора Гельмгольца, помимо параметров, указанных в формуле (1.20), определяется также и инерцией движущегося в горле резонатора воздуха (в колебательное движение вовлекается масса воздуха вблизи горла с обоих концов). Это характерно для случая, когда длина горла меньше диаметра (ячейки ЗПК для авиадвигателей – типичный пример).

При сравнении теоретических значений собственных частот полученных с помощью выражения (1.20) и практических значений, можно обнаружить отличие в этих результатах. Чтобы уменьшить данные отличия, Релеем [14] была предложена поправка на длину горла.

С учетом поправки Рэля формула для определения собственной частоты выглядит следующим образом:

$$\omega_0 = c \sqrt{\frac{S}{V l_c}}, \quad (1.22)$$

где  $l_c = l + l_i + l_e$  – эффективная длина горла резонатора, которая является суммой действительной длины горла  $l$  и присоединенными длинами горла с внутренней  $l_i$  и внешней  $l_e$  стороны резонатора [2]. Сумма  $l_i + l_e$  называется концевой поправкой.

Существует много работ, в которых представляют выражения для присоединенной длины горла. В своих работах [14] Рэлей показал, что для отверстия в бесконечной перегородке присоединенная длина отверстия  $l_r$  с одной стороны перегородки пропорциональна радиусу отверстия  $r$ , причем имеет место неравенство:

$$\frac{\pi}{4} r < l_r < \frac{8}{3\pi} r. \quad (1.23)$$



Поэтому поправка для горла резонатора примет вид  $r = 2l_r$  (на оба конца). Но позднее авторами в работах [1,3] было установлено, что чаще всего имеет место  $l_i \neq l_e$ , и, оставляя данный факт неучтенным, можно получить серьезную ошибку в теоретических расчетах (до 30 %). Данный факт особенно проявляется при малых размерах горла резонатора. Так, в работе [3] показано, что эффективная длина  $l_c$  связана с действительной длиной  $l$  при помощи формулы:

$$l_c = l + k\sqrt{S} = l + 0,8\sqrt{S}. \quad (1.24)$$

Величина  $\delta = l_i + l_e$  в данном случае будет равна  $0,8\sqrt{S}$ . В некоторых работах [12] предложен коэффициент  $k$  равный 0,96 вместо 0,8.

В другой работе [5] можно встретить следующее выражение для оценки эффективной длины горла резонатора:

$$l_c = l + ur = l + 1,7r, \quad (1.25)$$

где  $r$  – радиус горла.

В работе [19] предложена следующая поправка на радиус горла:

$$l_c = l + 0,6r + \frac{8}{3\pi}r. \quad (1.26)$$

Слагаемое  $0.6r$  является поправкой на конец горла со стороны атмосферы, а слагаемое  $\frac{8}{3\pi}r$  - поправка для конца горла, которая вставлена во внутреннюю часть резонатора.

В более поздних исследованиях [1,8] авторами получено следующее выражение для присоединенной длины цилиндрического резонатора:

$$l_i = \alpha(1 - \beta g)r, \quad (1.27)$$

где  $\alpha, \beta$  – коэффициенты, зависящие от  $l$  (табл. 1.1);  $g = \sqrt{\frac{S_0}{S}}$ ,  $S$  – площадь сечения объема резонатора,  $S_0$ - площадь поперечного сечения горла резонатора.

Таблица 1.1. Численные значения коэффициентов  $\alpha, \beta$

Коэффициенты	Длина горла $l$ , мм			
	<b>0,5</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>5</b>
$\alpha$	0,804	0,808	0,815	0,820
$\beta$	1,37	1,34	1,34	1,34

Для присоединенной длины  $l_e$  было получено выражение [11]:

$$l_e = \alpha \left( 1 - \beta_1 \left( \frac{d_0}{b} \right) + \beta_2 \left( \frac{d_0}{b} \right)^2 - \beta_3 \left( \frac{d_0}{b} \right)^3 \right) \frac{d_0}{2}, \quad (1.28)$$

где  $\alpha = 0,815$ ,  $d_0$  - диаметр горла,  $b$  - ширина прямоугольного канала, в котором установлен резонатор. Коэффициенты  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  зависят от соотношения параметров прямоугольного канала (табл. 1.2).

Таблица 1.2. Значения коэффициентов  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$

$r/b$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
<b>0,5</b>	1,48	0,53	0,16
<b>1</b>	0,97	0,32	0,07
<b>2</b>	0,6	0,52	0,24

Подставим ранее упомянутые выражения для  $l_i$  и  $l_e$  в формулу для цилиндрического резонатора [11]:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \frac{g}{\sqrt{L(l + l_i + l_e + L \frac{g^2}{3})}}, \quad (1.29)$$

где  $L$  – высота полости резонатора. Более детальное изучение звуковых волн в горле резонатора описано в статье [4]. В данной статье авторами исследовалось так называемое акустическое течение в горле, которое образуется волнами большой мощности. Ими было установлено, что описание звуковых волн в линейной постановке корректно для малых амплитуд, точнее до 120 дБ. При превышении данного значения возникают нелинейные эффекты, которые приводят к большим значениям средней скорости в горле резонатора.

Пантоном [18] было показано, что для расчета собственной частоты резонатора с полостью цилиндрической формы нужно использовать выражение:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl_c + L^2S/3}}, \quad (1.30)$$

где  $L$ -длина полости резонатора.

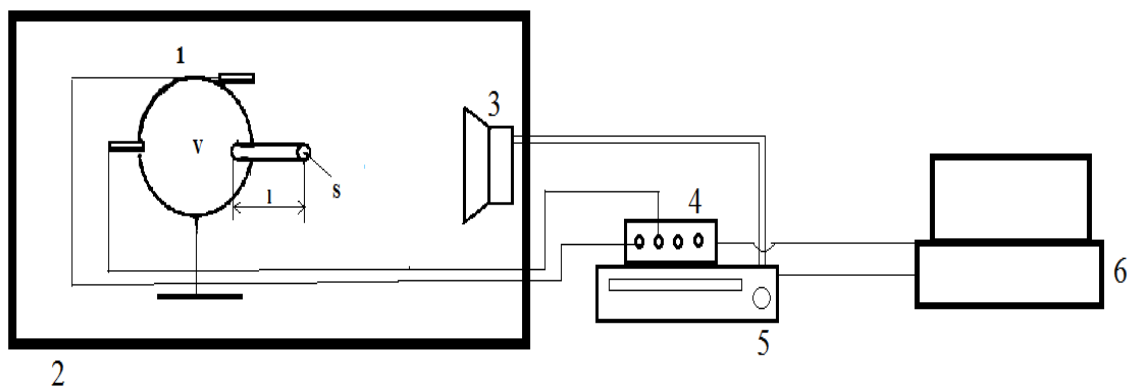
Проанализировав данные статьи, можно отметить, что в настоящий момент нет точного выражения для концевой поправки. Где-то приводятся определенные выражения для нее, а где-то указывается, что поправка является константой. Одной из задач данной работы является поиск значения для данной концевой поправки.

## ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Настоящие экспериментальные исследования проводятся для изучения влияния геометрии резонатора Гельмгольца на его частоту собственных колебаний. Для этого были разработаны экспериментальные установка и модели резонаторов с тремя формами камер: сферической, кубической и цилиндрической.

### 2.1 Методика проведения эксперимента. Оценка погрешности измерения

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.1.



*Рис. 2.1. Экспериментальная установка для исследования характеристик резонатора Гельмгольца*

В шумоизолирующей камере (2) был расположен резонатор исследуемый резонатор Гельмгольца (1). В экспериментальной установке были использованы динамик JBL (3), анализатор спектра Zet 017-u4 (4), звуковой усилитель Pioneer (5) и персональный компьютер (ПК) (6). Запись сигналов производилась микрофонами МПА 261 (1 класс точности) и ВС 501 (3 класс точности).

На ПК был сгенерирован белый шум, который через звуковой усилитель подавался на динамик.

С помощью программы ZetPanel были записаны сигналы с микрофонов и конвертированы в звуковые файлы, которые заносились в Cool Edit Pro 2.1 для получения спектров звуковых сигналов.

Для резонаторов со сферической и кубической камерой измерения проводились с различными длинами и диаметрами горловин. Для цилиндрического резонатора измерения проводились для горловин разной длины одного диаметра. Также в цилиндрическом резонаторе изменялся объем путем перемещения стенки в полости резонатора. Измерения проводились на 5 разных объемах.

Обработка записанных сигналов производилась в программе Cool Edit Pro 2.1, с помощью которой было произведено спектральное представление сигнала по частотам. После получения данных о спектре записанных сигналов, значения амплитуд с внешнего микрофона делились на значения амплитуд с внутреннего микрофона. Далее строились графики зависимости полученных отношений амплитуды внутри резонатора к амплитуде снаружи резонатора -  $K$  от частоты, с помощью которых были найдены резонансные частоты.

Для определения относительной погрешности косвенно измеренной теоретической частоты, использовалась методика, описанная в [6].

Приборные погрешности занесены в таблицу 2.1

*Таблица 2.1. Приборные погрешности*

<i>Штангенциркуль</i>	<i>0,1 мм</i>
<i>Миллиметровая линейка</i>	<i>1 мм</i>
<i>Спектроанализатор</i>	<i>0,381 Гц</i>

Таблица 2.2. Выражения для оценки относительной погрешности косвенно измеряемых величин, вычисляемых по некоторым расчетным формулам [6, с.11]

Расчетная формула величины $a = f(x,y)$	Относительная погрешность величины $a$
$x*y$	$\varepsilon_x + \varepsilon_y$
$\frac{x}{y}$	$\varepsilon_x + \varepsilon_y$
$x^n$	$n * \varepsilon_x$
$\sqrt[n]{x}$	$\left  \frac{1}{n} \right  * \varepsilon_x$

Оценим относительную инструментальную погрешность измерений.

$$\varepsilon_{f_{\text{практ}}} = \frac{\Delta f_{\text{приб}}}{f} * 100\% \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_{f_{\text{практ}}} = \frac{0,381 \text{ Гц}}{59,746 \text{ Гц}} * 100\% = 0,63\% \quad (2.2)$$

Исходя из формулы (20) для расчета собственной частоты резонатора Гельмгольца, с учетом, что  $S = \frac{\pi d^2}{4}$ ,  $V = \frac{\pi D^2}{4} L$ , получим:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \frac{d}{D} \sqrt{\frac{1}{lL}} \quad (2.3)$$

Тогда для расчета относительной погрешности теоретической частоты получим:

$$\varepsilon_{f_{\text{теор}}} = \left( \frac{1}{2} \frac{\Delta l_{\text{приб}}}{l} + \frac{1}{2} \frac{\Delta L_{\text{приб}}}{L} + \frac{\Delta D_{\text{приб}}}{D} + \frac{\Delta d_{\text{приб}}}{d} \right) * 100\% \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_{f_{\text{теор}}} = \left( \frac{1}{2} \frac{0,1 \text{ мм}}{20,5 \text{ мм}} + \frac{1}{2} \frac{1 \text{ мм}}{135 \text{ мм}} + \frac{0,1 \text{ мм}}{77,7 \text{ мм}} + \frac{0,1 \text{ мм}}{14 \text{ мм}} \right) * 100\% = 1,45\% \quad (2.5)$$

## 2.2 Резонатор со сферической камерой

В данной части эксперимента был исследован классический резонатор Гельмгольца, который представляет собой сферический сосуд с открытым горлом.

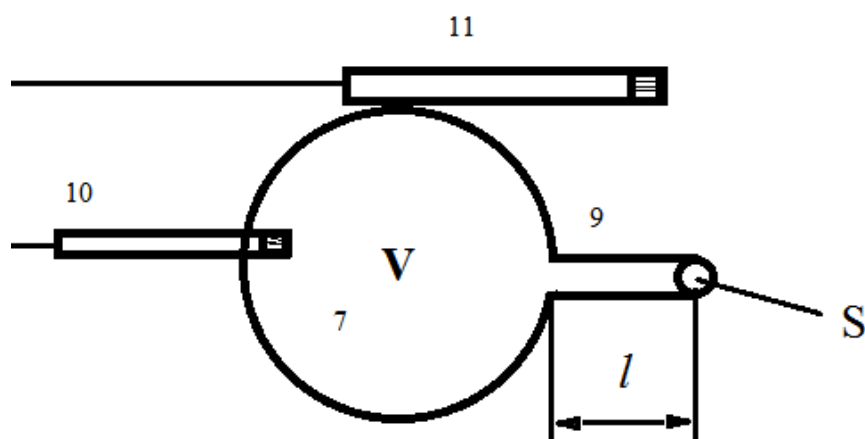


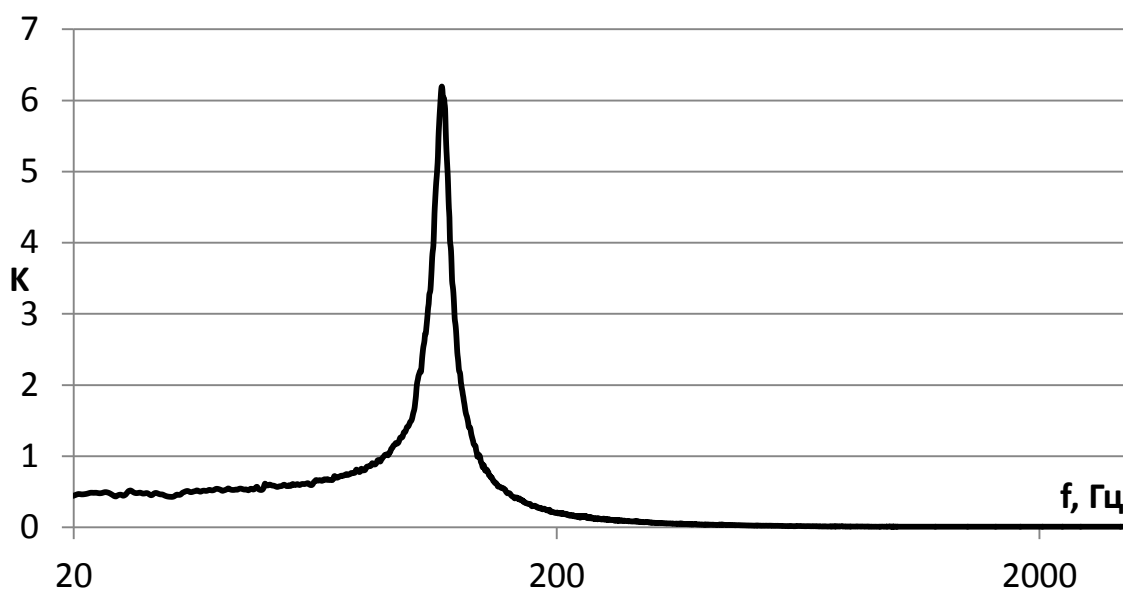
Рис. 2.2. Резонатор Гельмгольца, используемый в эксперименте 4

Резонатор (рис.2.2) представляет собой сферический сосуд объемом  $V=297 \text{ см}^3$ . В стенку сосуда вставлялось цилиндрическое горло резонатора с внутренним диаметром  $d$ . В установке было использовано два микрофона. Один был направлен внутрь резонатора, другой регистрировал поступающий на резонатор звуковой сигнал. Сигналы с микрофонов поступали на анализатор спектра (4), с помощью которого они оцифровывались и заносятся в память ПК.

После обработки спектров сигналов, были найдены практические значения собственных частот для резонатора с разными длинами горловин.

График зависимости коэффициента усиления  $K$  (отношение амплитуды звуковой волны внутри резонатора к амплитуде снаружи) от частоты представлен на рисунке 2.3. На нем наблюдается только один пик вблизи собственной частоты резонатора, рассчитанной по формуле (1.20). Такие графики были построены для 6 значений длин горловин и для 3 значений диаметров. Анализируя резонансные кривые, были определены полосы

пропускания на уровне 0,707 и затем с их помощью были вычислены значения добротностей для разных конфигураций резонатора со сферическим объемом.



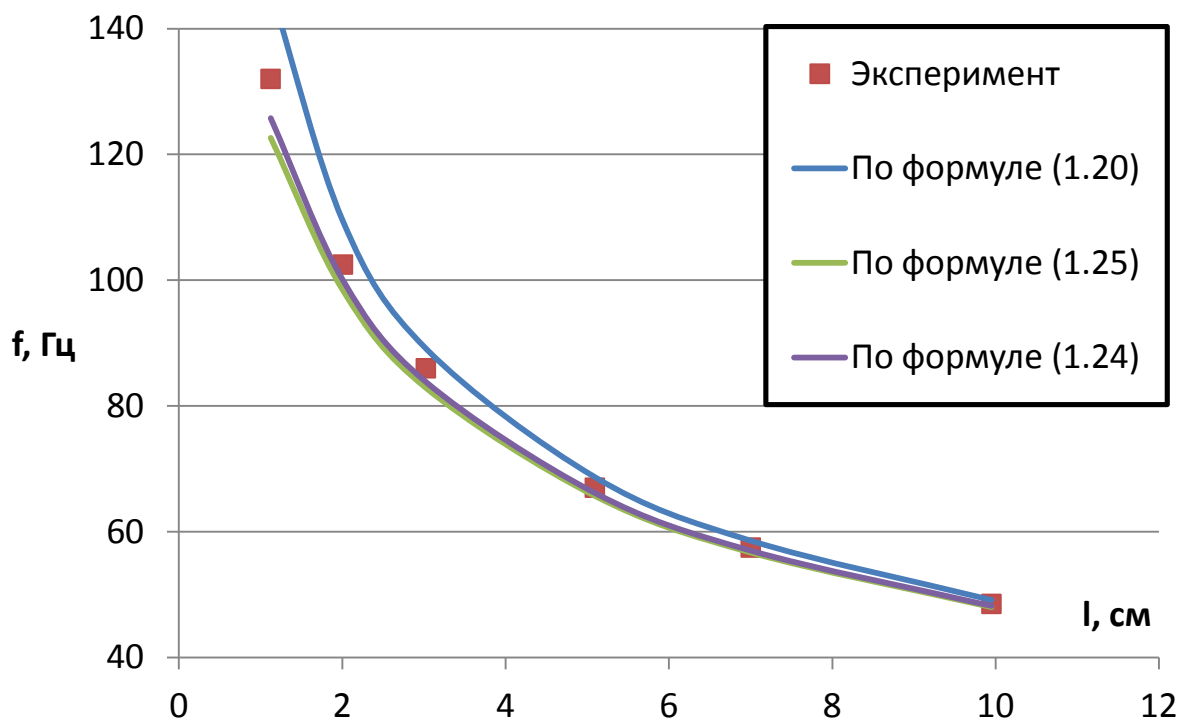
*Рис. 2.3. Зависимость коэффициента усиления  $K$  от частоты для резонатора с горлом диаметра 9,5 мм и длиной 49 мм*

График зависимости собственных частот от величины длины горла представлен на рисунке 2.4. Также на нем нанесены графики для теоретического выражения (1.22) с учетом присоединенной длины (1.24) и (1.25) и для выражения (1.20). Из графика видно, что расхождение с теорией тем сильнее, чем меньше длина горла. Выражение с поправкой на длину горла уменьшает расхождения теоретических значений с экспериментальными, однако при уменьшении длины горла эти расхождения все же проявляются.

Исходя из практических значений собственных частот, были вычислены значения концевых поправок  $\delta = l_i + l_e$ . В формулу для собственной частоты,

$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl_c}}$ , были подставлены экспериментальные значения собственных частот  $f_0$ , а  $l_c = l + \delta$ .





*Рис. 2.4. График зависимости теоретических и практических частот от длины горла ( $d=5,57$  мм)*

На рисунке 2.5 представлена зависимость поправки  $\delta$  от длины горла для разных диаметров. Анализируя график можно заметить, что для резонатора со сферическим объемом значение поправки  $\delta$  практически не меняется от длины горла и находится вблизи одной некоторой величины, однако данная величина для разных диаметров горловин отличается, и можно предположить, что концевая поправка для сферического резонатора зависит от диаметра горла и практически не зависит от длины горловины.

На рисунках 2.6, 2.7 представлены графики зависимостей коэффициентов  $k$  и  $u$  (выражение (1.24) и (1.25)) от длины горла для разных диаметров горловин. На них также нанесены значения, предложенные в работах [3,5].

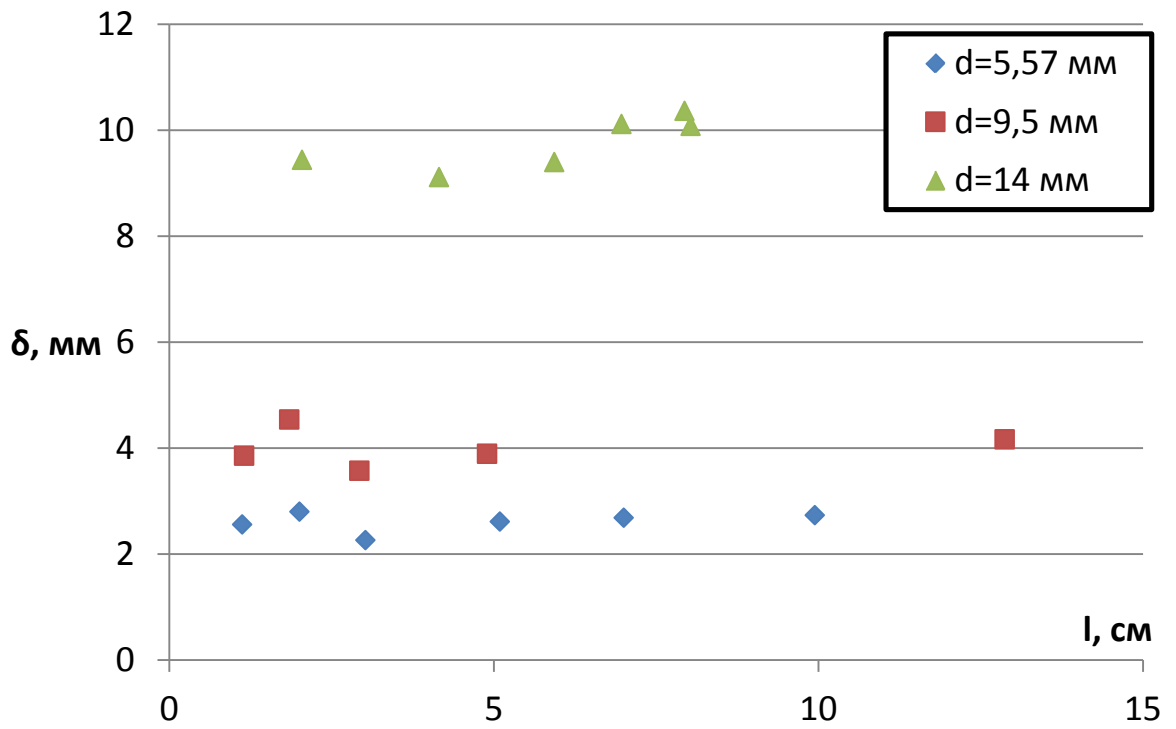


Рис. 2.5. График зависимости поправки  $\delta$  от длины горла

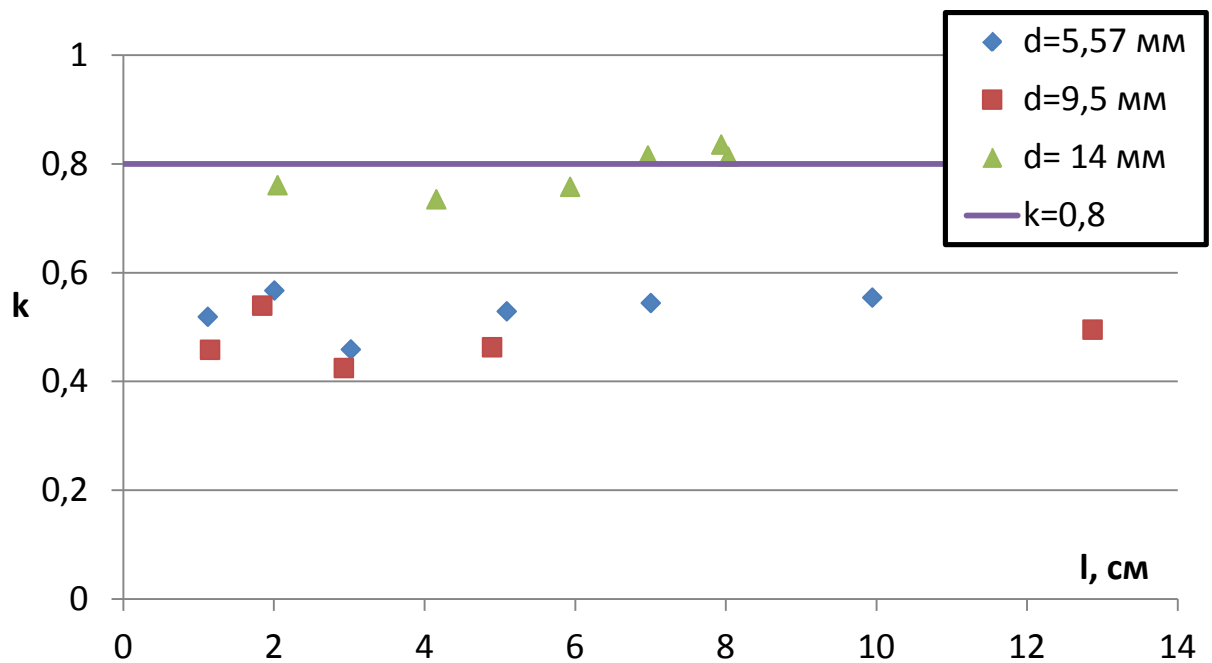


Рис. 2.6. Зависимость коэффициентов  $k$  для сферического резонатора.

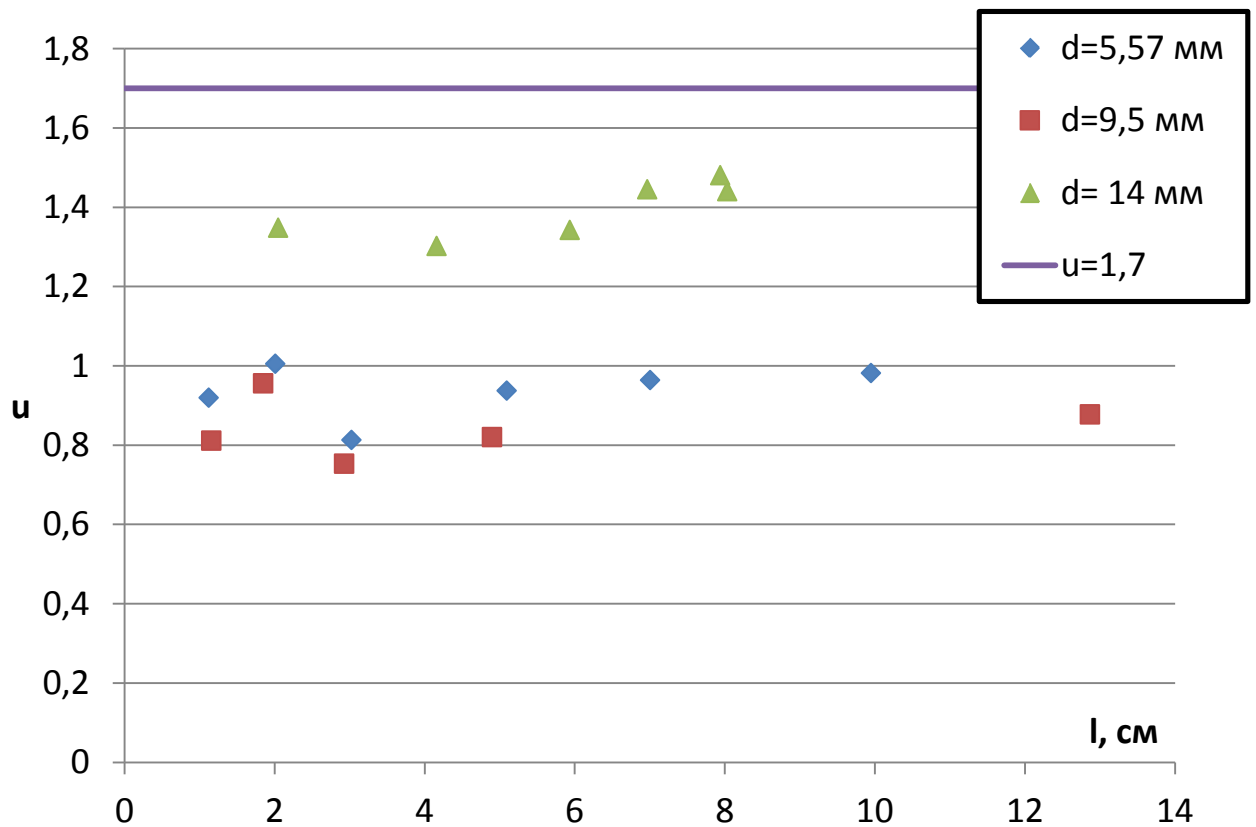


Рис. 2.7. Зависимость коэффициентов  $u$  для сферического резонатора.

Анализируя графики, можно заметить, что значение коэффициента  $k$ , предложенное в [3], близко по значению к коэффициенту, полученному экспериментально для  $d=14$  мм. Значение коэффициента  $u$  предложенное в [5] отличается от экспериментальных значений.

Значения теоретических и практических собственных частот, значения поправок  $\delta$ , добротностей  $Q$ , коэффициентов  $k$ ,  $u$  для разных параметров резонатора приведены в приложении 1 в таблице А.

### 2.3 Резонатор с кубической камерой

В данной части эксперимента был исследован резонатор Гельмгольца, который представляет собой сосуд кубической формы с открытым горлом.

В данной части эксперимента использовался резонатор с камерой кубической формы объемом  $V=400$  см<sup>3</sup>. (рис. 2.8)

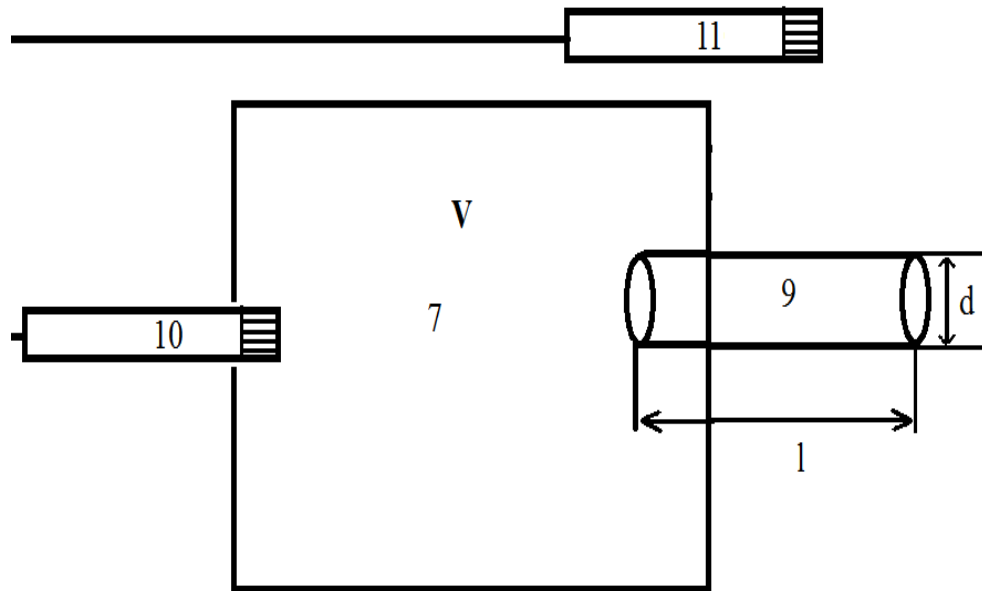


Рис. 2.8. Резонатор Гельмгольца с кубической камерой, используемый в эксперименте

График зависимости коэффициента усиления  $K$  от частоты представлен на рисунке 2.9. На нем, как и в случае резонатора со сферическим сосудом наблюдается только один пик вблизи собственной частоты резонатора, рассчитанной по формуле (1.20). Анализируя резонансные кривые, были определены полосы пропускания на уровне 0,707 и затем с их помощью были вычислены значения добротностей для разных конфигураций резонатора с кубическим объемом.

График зависимости собственных частот от величины длины горла представлен на рисунке 2.10. Также на нем нанесены графики для теоретического выражения (1.22) с учетом присоединенной длины (1.24) и (1.25) и для выражения (1.20).

Исходя из практических значений собственных частот, были вычислены значения концевых поправок  $\delta = l_i + l_e$ . В формулу для собственной частоты,

$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl_c}}$ , были подставлены экспериментальные значения собственных частот  $f_0$ , а  $l_c = l + \delta$ .

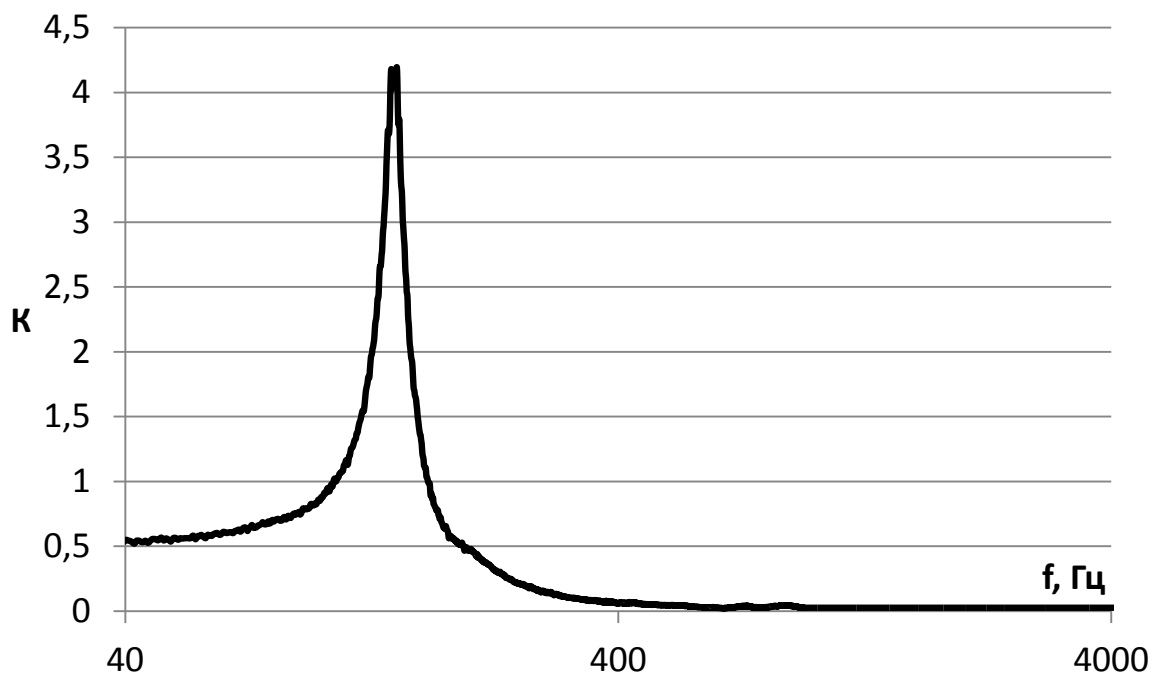


Рис. 2.9. Зависимость коэффициента усиления  $K$  от частоты для резонатора с горлом диаметра 9,5 мм и длиной 18,5 мм

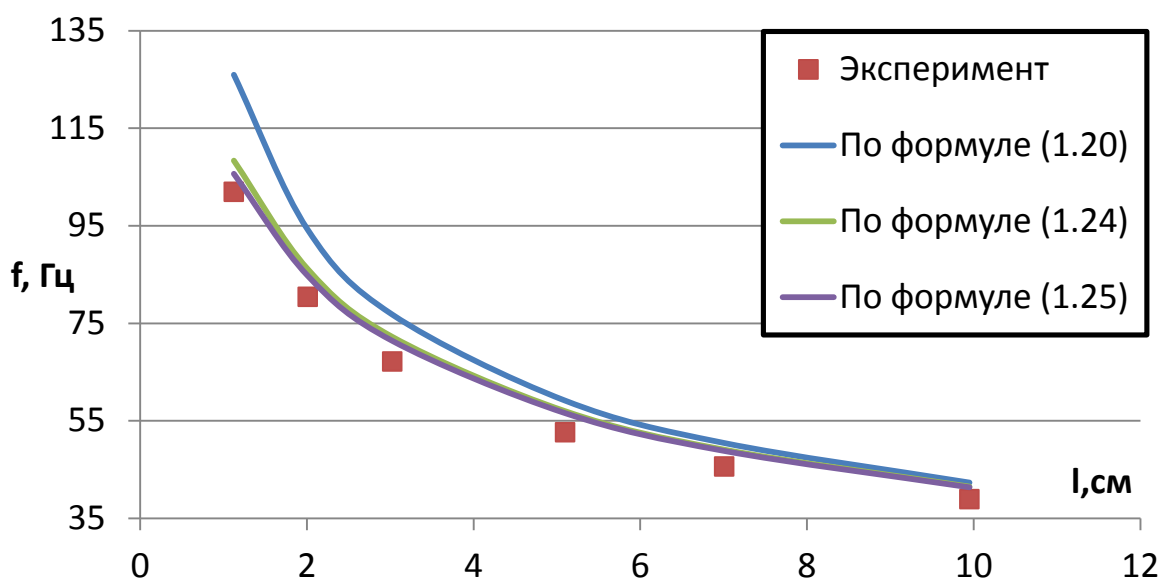


Рис. 2.10. График зависимости теоретических и практических частот от длины горла ( $d=5,57$  мм)

Экспериментальные значения собственных частот для резонатора с кубической камерой хорошо описываются выражением (1.20), однако

расхождения с теоретическими значениями больше, чем в случае сферического резонатора.

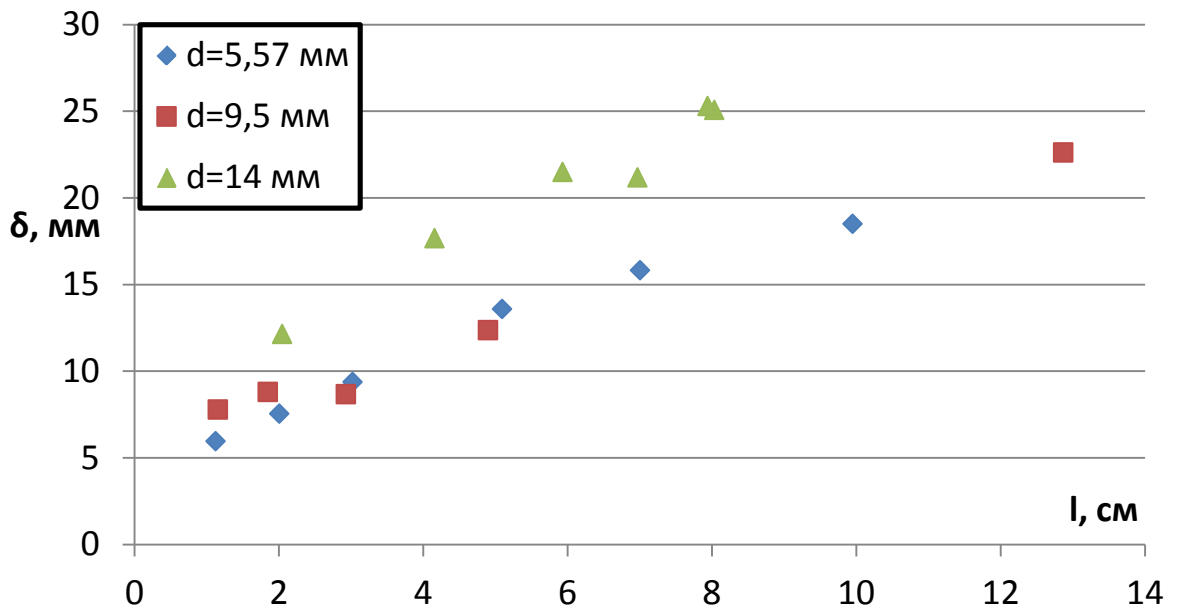


Рис. 2.11. График зависимости поправки  $\delta$  в зависимости от длины горла для кубического резонатора

Из рисунка 2.11 можно увидеть, что характер поведения поправки  $\delta$  в зависимости от длины горла иной, чем для сферического резонатора. Данная поправка линейно зависит от длины горла и для различных диаметров горловин угол наклона прямых отличается.

На рисунках 2.12, 2.13 представлены графики зависимостей коэффициентов  $k$  и  $u$  от длины горла для разных диаметров горловин для резонатора с кубической камерой. На них также нанесены значения, предложенные в работах [3,5].

Анализируя графики, можно сказать, что значения коэффициентов  $k$  и  $u$  для резонатора с кубической камерой не являются константами, а линейно зависят от длины горла. Также имеется некая зависимость от диаметра горла, так как наклоны прямых для разных диаметров не совпадают.

Значения теоретических и практических собственных частот, значения поправок  $\delta$ , добротностей  $Q$ , коэффициентов  $k$ ,  $u$  для разных параметров резонатора с кубической камерой приведены в приложении 1 в таблице Б.

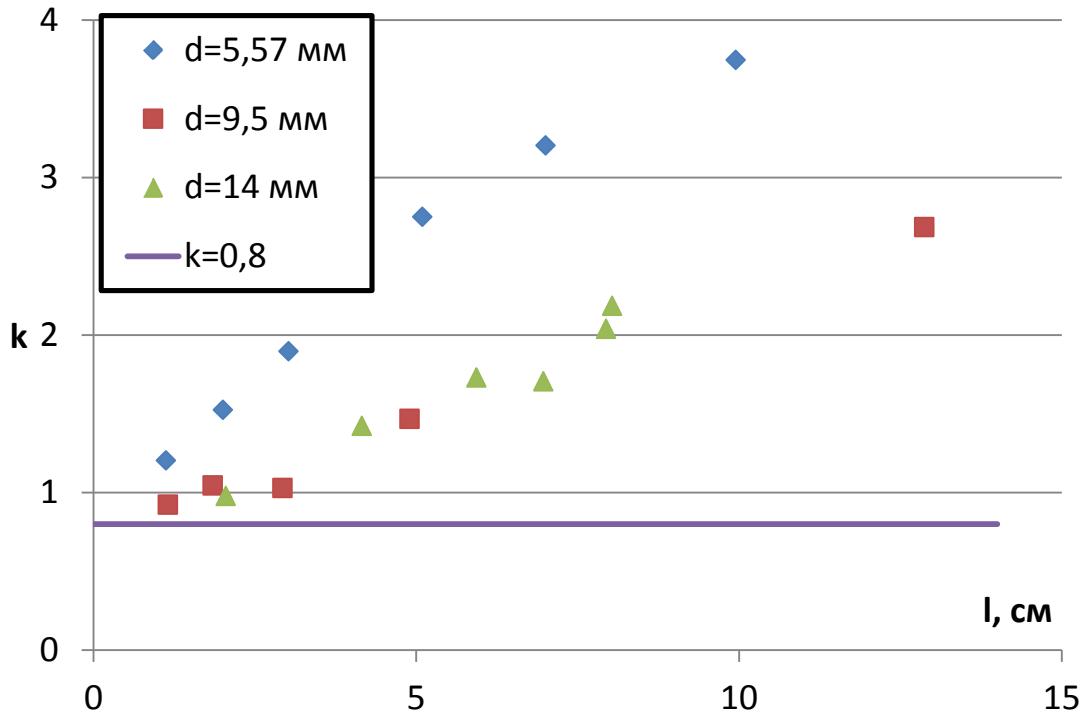


Рис. 2.12. Зависимость коэффициентов  $k$  от длины для резонатора с кубической камерой

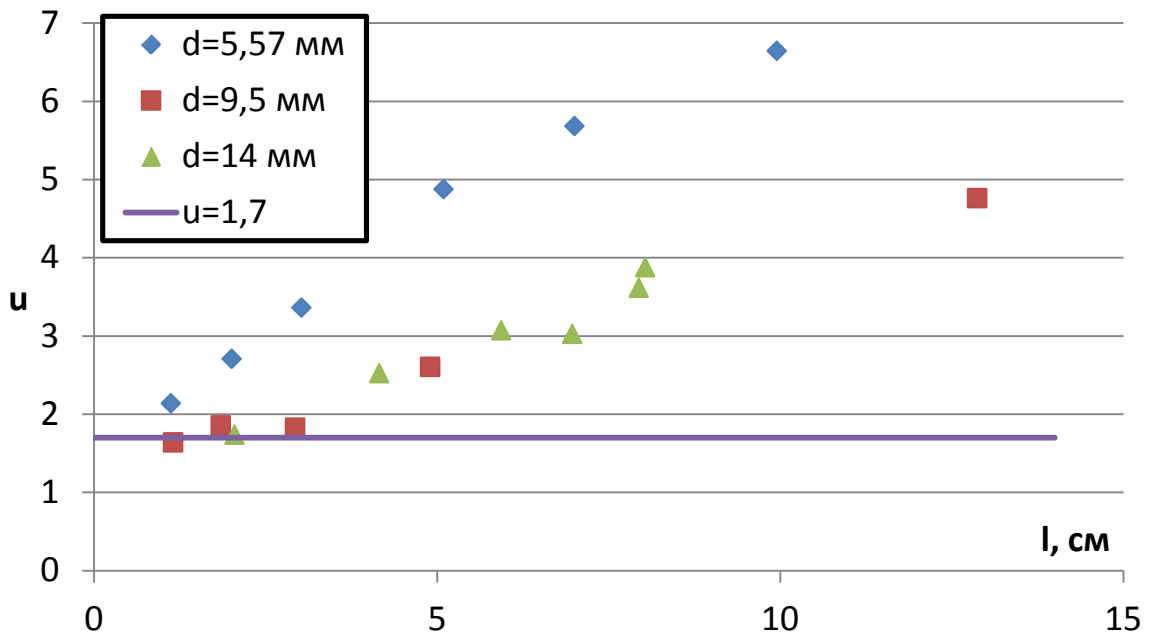


Рис. 2.13. Зависимость коэффициентов  $u$  от длины для резонатора с кубической камерой

## 2.4 Резонатор с цилиндрической камерой.

В данной части эксперимента был исследован резонатор Гельмгольца, который представляет собой цилиндрический сосуд с открытым горлом.

Схема экспериментальной установки аналогична схеме на рисунке 2.1, только в данной части эксперимента использовался резонатор с цилиндрической камерой (рис. 2.14).

Резонатор представляет собой трубу с внутренним диаметром  $D$  и длиной  $L$ , ограничивающей цилиндрический объем (7). Оба конца трубы были закрыты стенками из оргстекла (8) толщиной  $h_1=h_2$ . В одну из стенок вставлялось цилиндрическое горло резонатора (9) с внутренним диаметром  $d$ .

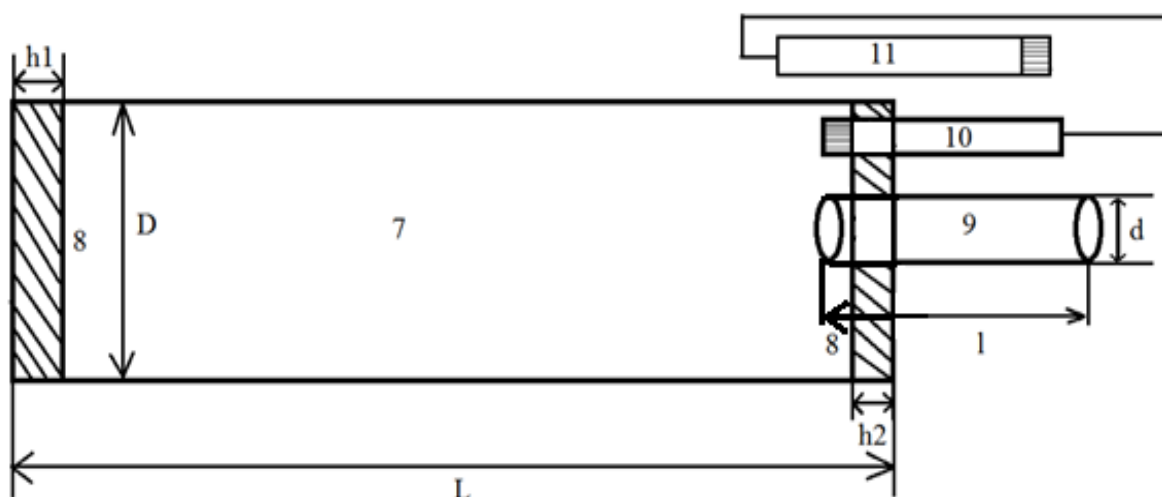


Рис. 2.14. Резонатор Гельмгольца с цилиндрической камерой, используемый в эксперименте

В ходе эксперимента, изменялись объем резонатора и длина горла. Объем менялся путем перемещения стенки резонатора вдоль его камеры.

На рисунке 2.15 представлена зависимость отношения амплитуд от частоты. Из данного графика можно заметить, что помимо основной собственной частоты, резонатор усиливает частоты, характерные для полуволнового резонатора с данной длиной, закрытого с обоих концов. Из сравнения теоретически рассчитанных частот и полученных практически



(табл.2.1) можно отметить, что в них имеются отличия, и поведение резонатора Гельмгольца с цилиндрическим объемом несколько отличается от поведения полуволнового резонатора.

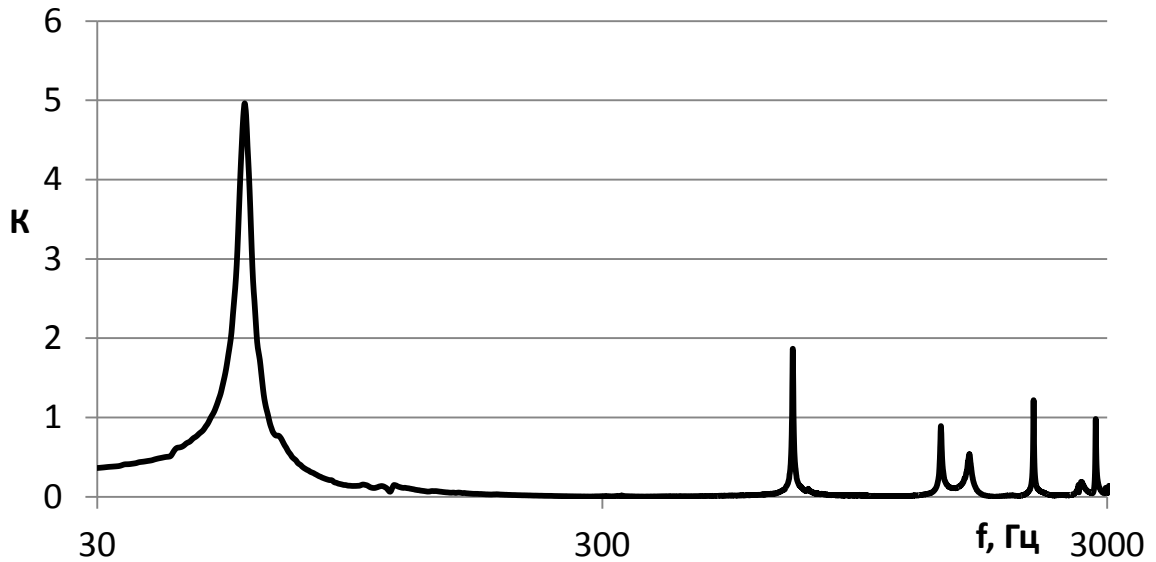


Рис. 2.15. Зависимость коэффициента усиления  $K$  от частоты для резонатора объемом  $1148 \text{ см}^3$  с горлом длиной  $10 \text{ см}$

Таблица 2.3. Сравнение теоретических частот для полуволнового резонатора с практическими результатами

$m$	$f_{\text{теор}} (\text{Гц})$	$f_{\text{эксп}} (\text{Гц})$
1	701,89	715,25
2	1403,79	1406,47
		1596,06
3	2105,69	2145,38
4	2807,59	2847,67

График зависимости собственных частот от величины длины горла представлен на рисунке 2.4. Также на нем нанесены графики для теоретического выражения (1.22) с учетом присоединенной длины (1.24) и (1.25), для выражения (1.20) и для выражения предложенного Пантоном (1.30).

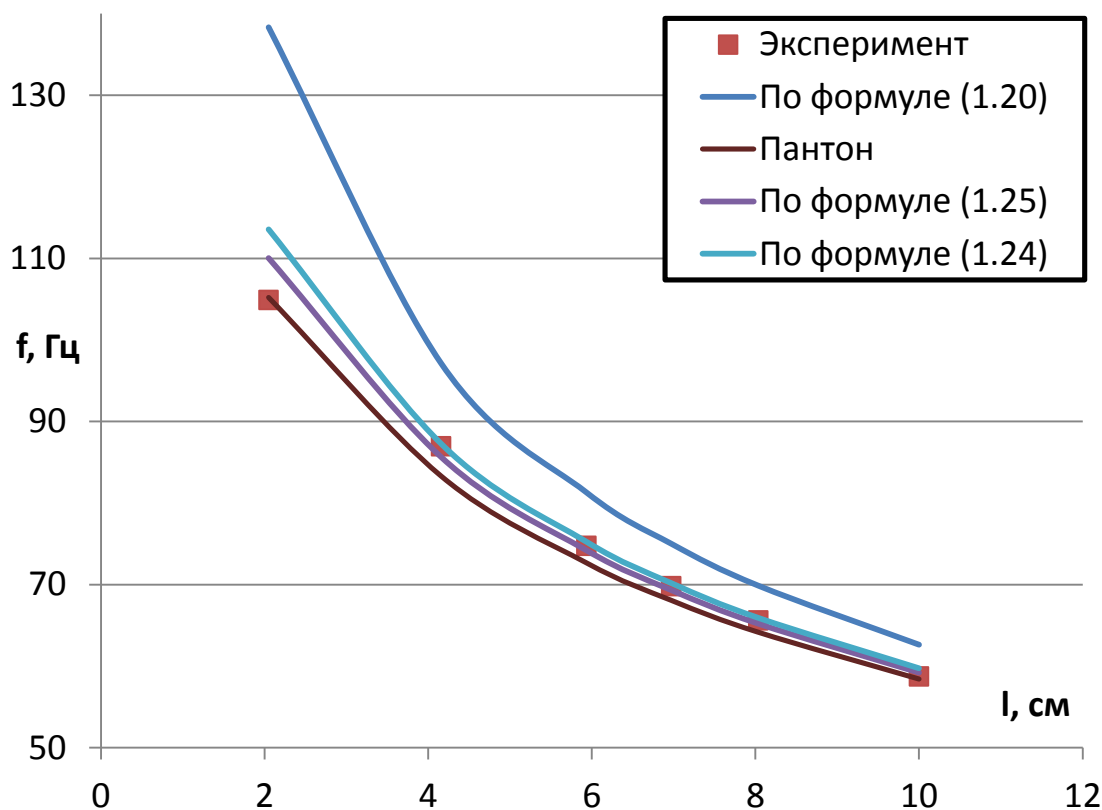
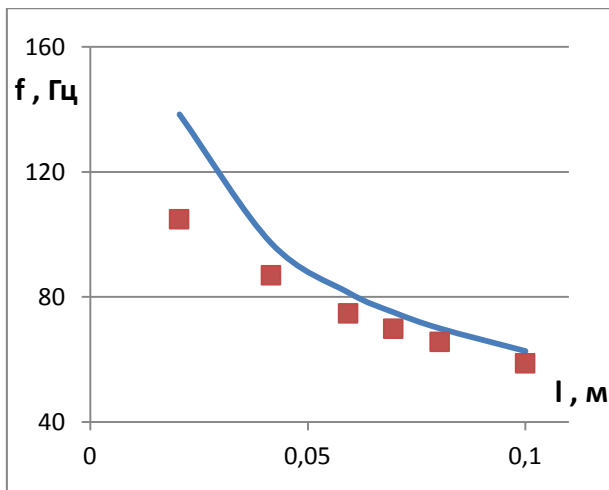
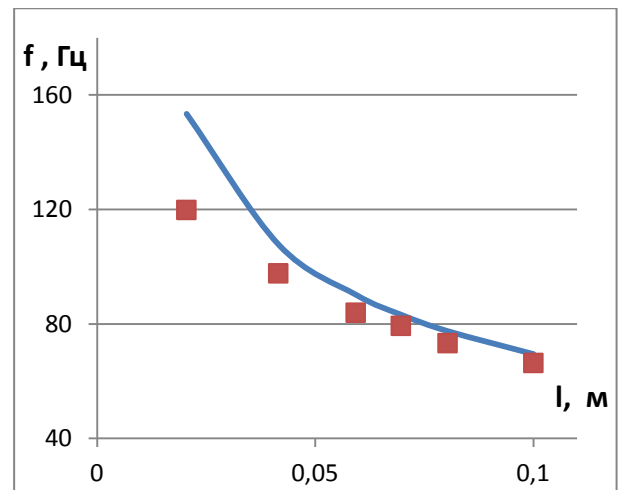


Рис. 2.16. Сравнение теоретических и экспериментальных значений собственных частот резонатора Гельмгольца ( $V=1148 \text{ см}^3$ ,  $d=14 \text{ мм}$ )

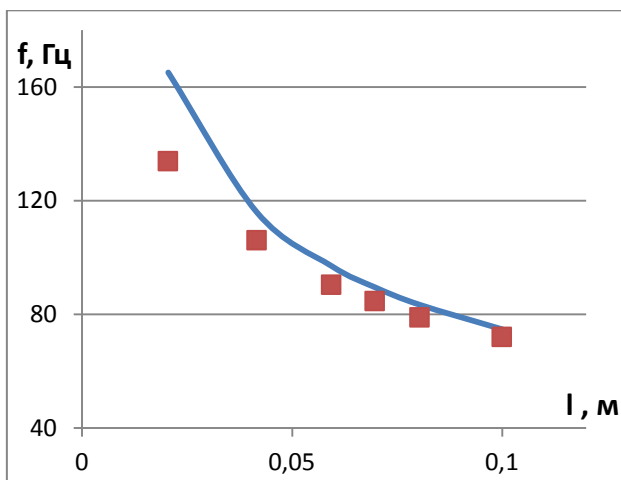
Для сравнения теоретических значений собственных частот (выражение (1.20)) для разных объемов и длин горловин с практическими данными были построены графики (рис. 2.17, 2.18). Анализируя графики можно заметить, что отклонение практических результатов от теоретических сильнее проявляется при изменении длины горла, нежели чем при изменении объема. Этот факт, вероятно, означает то, что поправка  $\delta$  не зависит от объема резонатора.



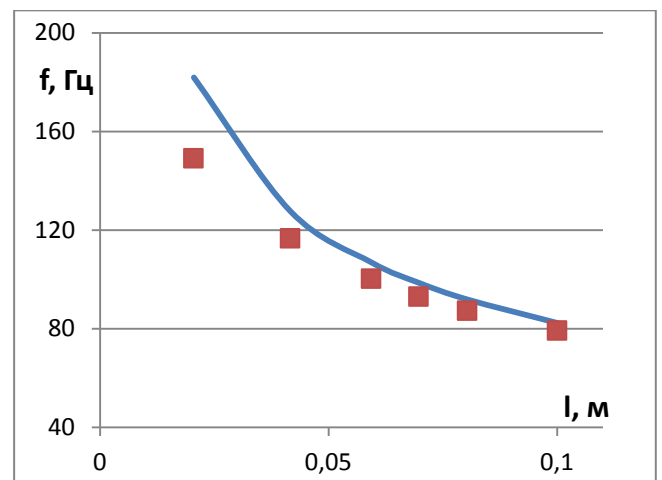
а)



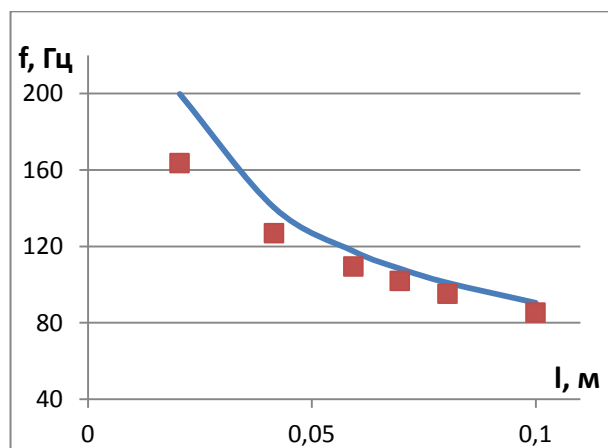
б)



в)



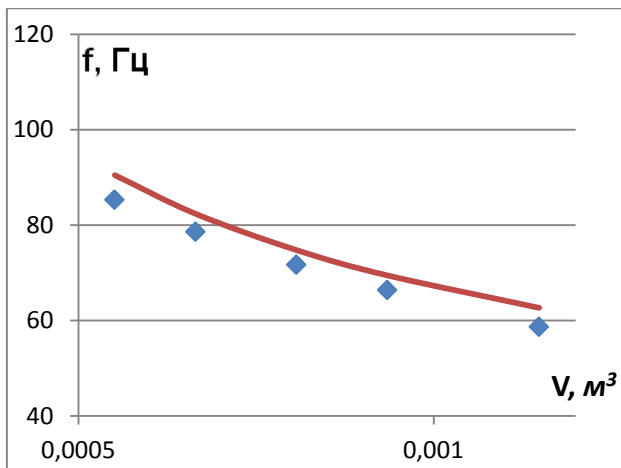
г)



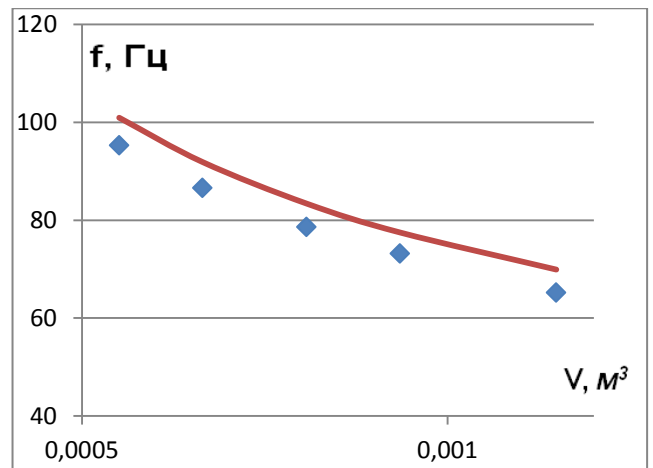
д)

Рис. 2.17. Графики зависимости теоретических и практических частот от длины горла для разных объемов (точками обозначены экспериментальные значения, линией – теоретические)

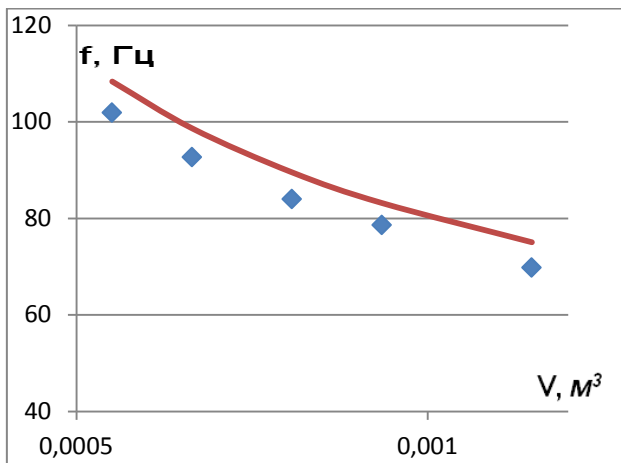
а) 1148 см<sup>3</sup>, б) 935 см<sup>3</sup> в) 807 см<sup>3</sup> г) 664 см<sup>3</sup> д) 550 см<sup>3</sup>



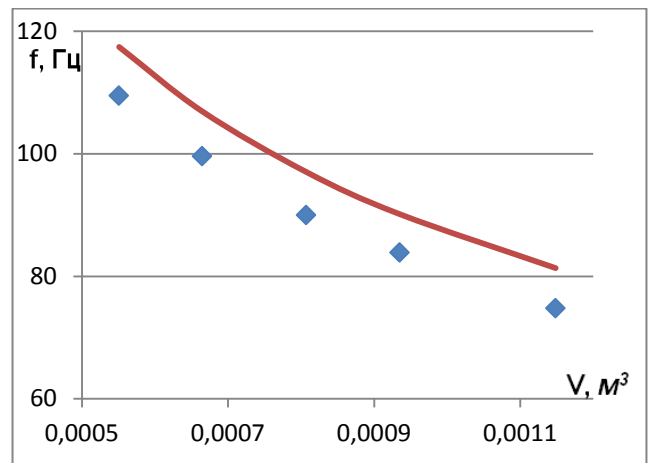
а)



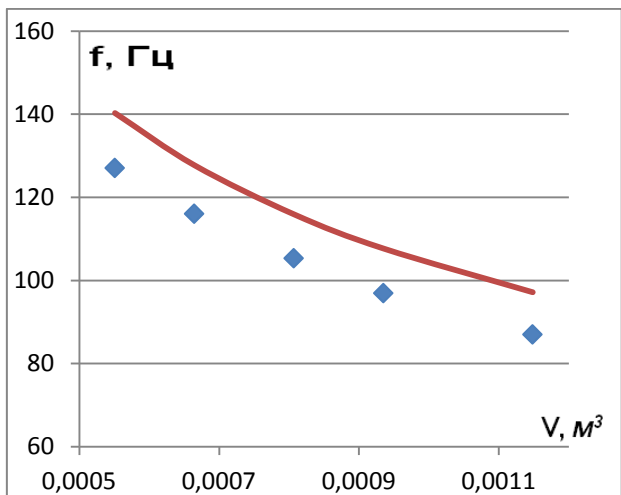
б)



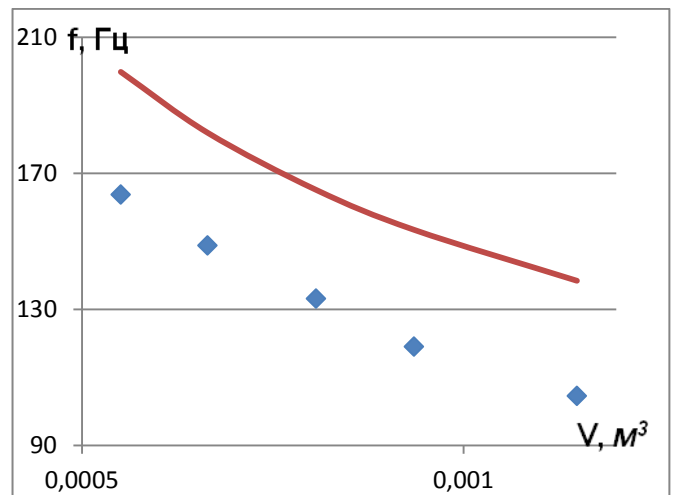
в)



г)



д)



е)

Рис. 2.18. Графики зависимости теоретических и практических частот от объема для разных длин горла (точками обозначены экспериментальные значения, линией – теоретические)

а) 10 см б) 8,03 см в) 6,97 см г) 5,93 см д) 4,16 см е) 2,05 см

Исходя из практических значений собственных частот были вычислены значения концевых поправок  $\delta = l_i + l_e$  (таблица 2.2). В формулу для собственной частоты,  $f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{vl_c}}$ , были подставлены экспериментальные значения собственных частот  $f_0$ , а  $l_c = l + \delta$ .

Таблица 2.4. Значения концевых поправок  $\delta$  (мм) для разных параметров резонатора

<i>l, см</i>	<i>V, см<sup>3</sup></i>				
	<b>1148,43</b>	<b>935,05</b>	<b>807,03</b>	<b>664,78</b>	<b>550,98</b>
<b>10</b>	10	9,4	7,5	7,7	10,1
<b>8,035</b>	10,8	9,5	9,2	8,5	8,9
<b>6,97</b>	10,8	8,9	8,2	8,6	8,6
<b>5,935</b>	10,8	9,1	9	8	8,4
<b>4,16</b>	10,3	8,9	8	8,1	8,8
<b>2,05</b>	15,4	13,1	10,6	9,9	9,9

Далее из выражений (1.24) и (1.25) были вычислены соответствующие коэффициенты для множителей *u* (табл. 2.3) и *k* (табл. 2.4).

Таблица 2.5. Значения коэффициентов *u* для разных параметров резонатора

<i>l, см</i>	<i>V, см<sup>3</sup></i>				
	<b>1148,43</b>	<b>935,05</b>	<b>807,03</b>	<b>664,78</b>	<b>550,98</b>
<b>10</b>	1,96	1,35	1,07	1,1	1,44
<b>8,035</b>	1,55	1,36	1,32	1,22	1,27
<b>6,97</b>	1,55	0,98	1,17	1,22	1,23
<b>5,935</b>	1,55	1,3	1,28	1,14	1,2
<b>4,16</b>	1,47	1,28	1,15	1,16	1,26
<b>2,05</b>	2,20	1,87	1,52	1,42	1,41

Таблица 2.6. Значения коэффициентов  $k$  для разных параметров резонатора

	$V, \text{ см}^3$				
$l, \text{ см}$	<b>1148,43</b>	<b>935,05</b>	<b>807,03</b>	<b>664,78</b>	<b>550,98</b>
<b>10</b>	1,11	0,76	0,6	0,62	0,81
<b>8,035</b>	0,87	0,77	0,74	0,68	0,72
<b>6,97</b>	0,87	0,55	0,66	0,69	0,69
<b>5,935</b>	0,87	0,73	0,72	0,64	0,68
<b>4,16</b>	0,83	0,72	0,65	0,66	0,71
<b>2,05</b>	1,24	1,05	0,86	0,8	0,79

На рисунке 2.19 представлена зависимость поправки  $\delta$  от длины горла для разных объемов. Из графиков видно, что для различных объемов камеры резонатора, поправки  $\delta$  практически совпадают. Также данные поправки практически не изменяются для различных горловин, кроме случая  $l=20,5$  мм, где значения поправки наибольшее для всех объемов.

Значения теоретических и практических собственных частот, значения поправок  $\delta$ , добротностей  $Q$ , коэффициентов  $k$ , и для разных параметров резонатора с кубической камерой приведены в приложении 1 в таблице В.

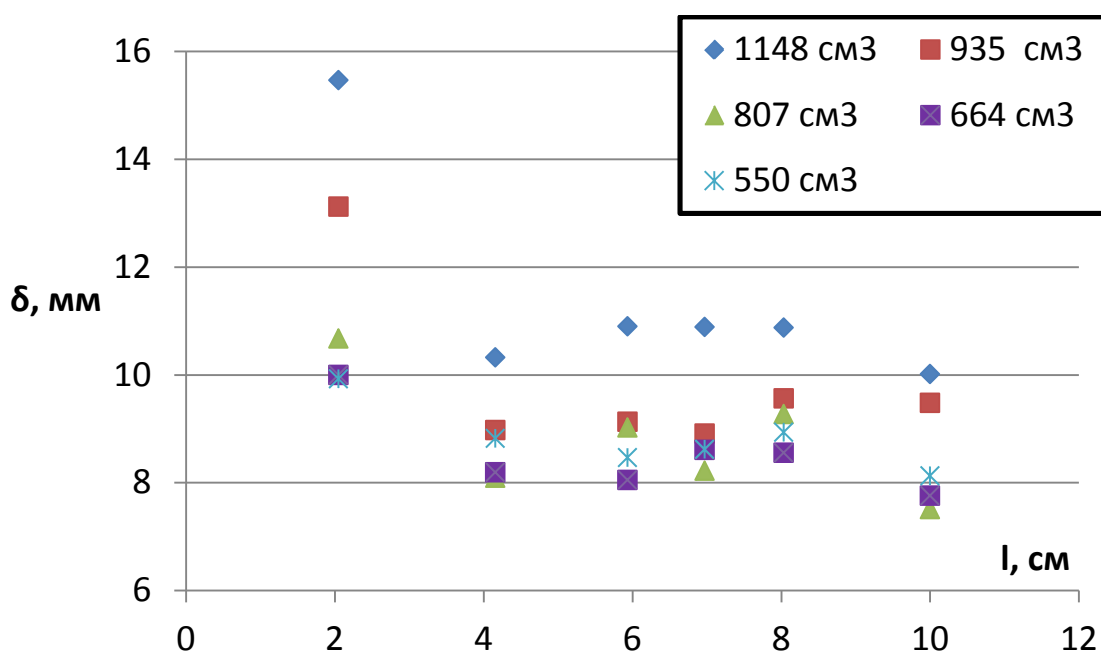


Рис. 2.19. График зависимости поправки  $\delta$  от длины горла для цилиндрического резонатора

Значения коэффициентов  $k$  и  $u$  представлены на следующих рисунках.

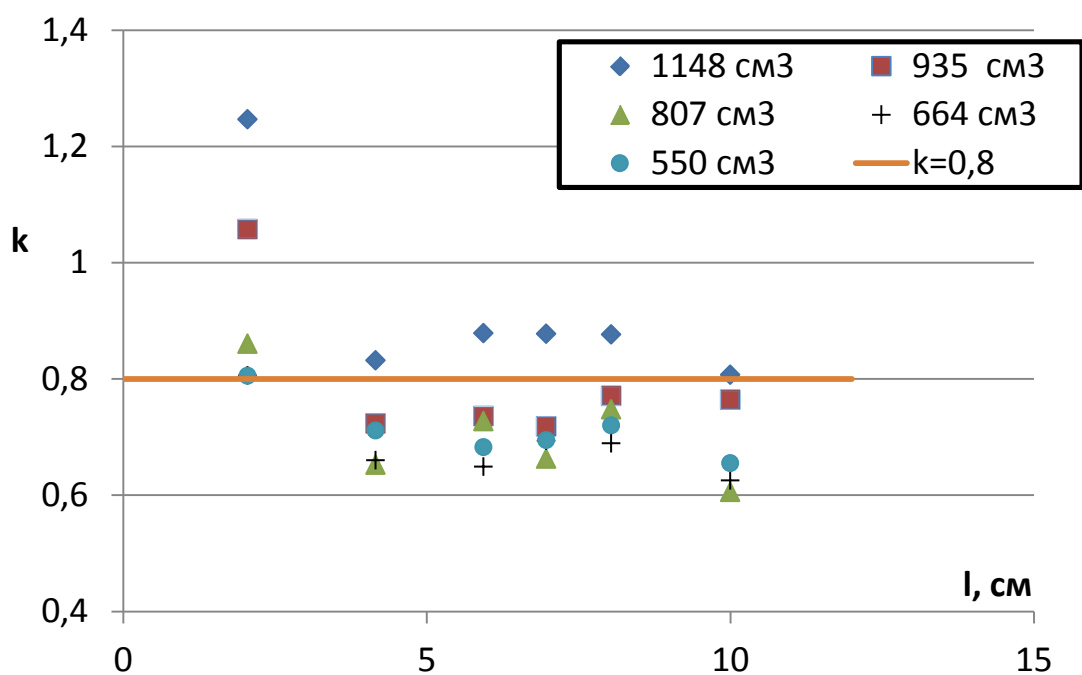


Рис. 2.20. Зависимость коэффициентов  $k$  от длины для резонатора с цилиндрической камерой

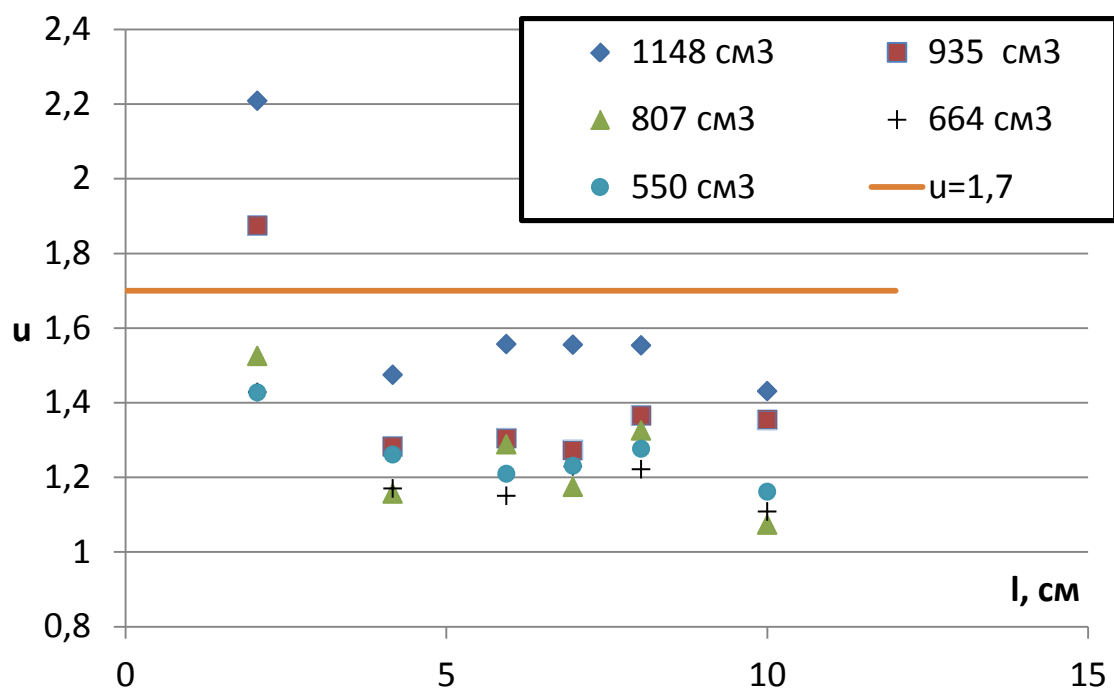


Рис. 2.21. Зависимость коэффициентов  $u$  от длины для резонатора с цилиндрической камерой

Расположение коэффициентов  $k$  и  $u$  близко к постоянным, предложенным в [3] и [5].

После проведения экспериментов по изучению зависимости величины поправки на присоединенную длину горла резонатора Гельмгольца, а также после изучения работ, освещающих данную тему, было выявлено, что на сегодняшний день нет выражения, которое точно описывало бы поведение резонансных частот резонатора Гельмгольца в зависимости от его геометрических параметров. Ведь расхождение теоретических и практических значений собственных частот в некоторых конфигурациях доходят до 30 процентов. Также отсутствует конкретное выражение для поправки на присоединенную длину горла, которая могла бы устранить данные расхождения теории и практики. В некоторых статьях можно найти выражения для данной поправки, однако в работах разных авторов они отличаются, а также значения коэффициентов, приведенные в данных работах, отличаются от тех, что были получены экспериментально в ходе дипломной работы. Остается также открытым вопрос по нахождению собственной частоты и величины поправки для резонаторов, имеющих различную форму объемов. Эта задача является актуальной, так как точное определение собственных частот очень важно в прикладных целях, например, при проектировке эффективных звукопоглощающих конструкций резонансного типа. Данные вопросы и задачи, остающиеся открытыми для решения на данный момент, дают возможность для продолжения изучения данной темы и проведения дальнейших исследований в этой области.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментального изучения характеристик акустического резонатора с разными формами камеры были получены следующие результаты:

*для сферического резонатора:*

- наблюдается только один резонансный пик, вблизи значения, рассчитанного по формуле (1.20);
- величина поправки  $\delta$  близка к некой постоянной, характерной для каждого диаметра горла;
- значение коэффициента  $k$ , предложенное в [3], близко по значению к коэффициенту, полученному экспериментально для  $d=14$  мм. Значение коэффициента  $u$  предложенное в [5] отличается от экспериментальных значений;

*для кубического резонатора:*

- как и в случае резонатора со сферическим сосудом наблюдается только один пик вблизи собственной частоты резонатора, рассчитанной по формуле (1.20);
- разница между практическими значениями собственных частот и теоретическими больше, чем в случае сферического резонатора;
- поправка  $\delta$  для кубического резонатора имеет линейную зависимость от длины горла, причем для разных  $d$  угол наклона прямых отличается;

*для цилиндрического резонатора:*

- помимо основного пика, характерного для акустического резонатора, присутствуют пики, соответствующие полуволновому резонатору;
- пики, характерные для полуволнового резонатора, наблюдаются на частотах, отличных от теоретических, а также наблюдаются пики нехарактерные ни для полуволнового резонатора, ни для четвертьволнового;

- величина поправки  $\delta$  близка к некой постоянной, и слабо зависит от объема, однако при уменьшении длины горла, наблюдается увеличение значения поправки для всех объемов;
- значения коэффициентов  $k, u$ , полученные экспериментально, близки по значениям, предложенными авторами в работах [3,5].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комкин А.И. О выборе параметров резонатора Гельмгольца в узком канале// Акустика неоднородных сред. Ежегодник РАО. Выпуск 12. – 2011. – стр.77-84. URL:<http://rao.akin.ru/Docs/Rao/raoyear12/77-84%20%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BA%D0%B8%D0%BD.pdf> (дата обращения: 24.05.2016).
2. Комкин А.И., Миронов М.А., Юдин С.И. Исследование акустических характеристик резонатора Гельмгольца // Доклад на XXVII сессии акустического общества. С-Петербург. – 2014. – стр. 1-7. URL:<http://rao.akin.ru/Rao/sess27/%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BA%D0%B8%D0%BD.pdf> (дата обращения: 23.05.2016).
3. Ingard U. On the theory and design of acoustic resonators // Journal Acoustical Society of America. – 1953. – Vol. 25. – № 6. – p. 1037–1061.
4. Panton R.I., Miller J.M. Resonant frequencies of cylindrical Helmholtz resonators // Journal Acoustical Society of America. – 2000. – Vol. 107. № 5. – p. 2360–2369.
5. Wikibooks Engineering Acoustics [Электронный ресурс] // Noise control with self-tuning Helmholtz resonators, available at: [http://en.wikibooks.org/wiki/Engineering\\_Acoustics/Noise\\_control\\_with\\_self-tuning\\_Helmholtz\\_resonators](http://en.wikibooks.org/wiki/Engineering_Acoustics/Noise_control_with_self-tuning_Helmholtz_resonators) (дата обращения: 19.05.2017).
6. Ефимова А.И., Зотеев А.В., Склянкин А.А. Общий физический практикум физического факультета МГУ. Погрешности эксперимента: Учебно-методическое пособие. – М.: МГУ, физический факультет. – 2012. – 39 с.
7. Алешкевич В.А., Деденко Л.Г., Караваев В.А. Колебания и волны: Лекции. – М.: Физический факультет МГУ. – 2001. – 143 с.
8. Комкин А.И., Миронов М.А., Юдин С.И. О присоединенной длине отверстий // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58. – № 6. – С. 677–682.
9. Alster M. Improved calculation of resonant frequencies of Helmholtz resonators // Journal of Sound and Vibration. – 1972. – Vol. 24. – № 1. – p. 63–85.
10. Duben A.P., Kozubskaya T.K., Korolev S.I. Acoustic flow in the resonator throat: Experiment and computational modeling. Acoustical Physics. – 2012. – Vol. 58. – № 1. – p. 69-80.

11. Комкин А.И., Миронов М.А., Юдин С.И. Собственная частота резонатора Гельмгольца на стенке прямоугольного канала // Акустический журнал. – 2014. – Т. 60. – № 2. – С. 145–151.
12. Морз Ф. Колебания и звук. – М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры. – 1949. – 497 с.
13. Савельев И. В. Курс общей физики: учеб. пособие для студентов вузов. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. – М.: Наука. – 1970. – 432 с.
14. Стретт Дж.В. (Лорд Рэлей). Теория звука. М.: Гос. изд-во технико-теор. лит-ры. – 1955. – Т. 2. – 476 с.
15. Яворский, Б.М. Справочник по физике. М.: Наука. – 1968. – 940 с.
16. Баженов Д.В., Баженова Л.А., Римский-Корсаков А.В. Глушитель шума в виде резонатора Гельмгольца на выходе воздуховода конечной длины // Акустический журнал. – 2000. – Т. 46. – № 3. – С. 306-311.
17. Федотов Е. С., Пальчиковский В. В. Исследования работы резонатора Гельмгольца в волноводе прямоугольного сечения // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 3 (38). – С. 107-126.
18. Panton R.I., Miller J.M. Resonant frequencies of cylindrical Helmholtz resonator// Journal Acoustical Society of America. – 1975. – Vol. 57. – № 6. – p. 1533-1535.
19. Акустика помещений [Электронный ресурс] // Основы акустики: архитектурная акустика. URL: <http://www.acoustic.ua/recommendations/688> (дата обращения: 30.05.2017).
20. Webster E., Davies C. The use of Helmholtz resonance for measuring the volume of liquids and solids // Sensors. – 2010 URL: [www.mdpi.com/journal/sensors](http://www.mdpi.com/journal/sensors) (дата обращения: 30.05.2017).

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица А. Значения теоретических и практических собственных частот, значения поправок  $\delta$ , добротностей  $Q$ , коэффициентов  $k$ ,  $u$  для разных параметров сферического резонатора ( $V=297 \text{ см}^3$ )

$d, \text{ мм}$	$l, \text{ мм}$	$f_{\text{теор}}, \text{ Гц}$	$f_{\text{эксн}}, \text{ Гц}$	$Q$	$\delta, \text{ мм}$	$u$	$k$
5,57	99,5	49,1	48,5	6	2,7	0,98	0,55
5,57	70,05	58,5	57,5	8,5	2,7	0,96	0,54
5,57	50,96	68,6	67	8,5	2,6	0,93	0,52
5,57	30,25	89,1	86	8,7	2,3	0,81	0,45
5,57	20,09	109,3	102,5	14	2,8	1	0,56
5,57	11,24	146,1	132	14	2,6	0,91	0,51
9,5	128,7	73,6	73,2	12	4,2	0,87	0,49
9,5	49	119,4	116,2	10	3,9	0,82	0,46
9,5	29,3	154,4	145,8	14	3,6	0,75	0,42
9,5	18,5	194,3	174,2	15	4,5	0,95	0,53
9,5	11,56	245,8	213	17	3,9	0,81	0,45
14	80,35	137,4	129	21	10,1	1,44	0,81
14	79,43	138,1	130	21	10,4	1,48	0,83
14	69,7	147,5	137,9	23	10,1	1,44	0,81
14	59,35	159,8	148,6	25	9,4	1,34	0,75
14	41,6	190,9	173	26	9,1	1,3	0,73
14	20,5	272	225,2	26	9,4	1,34	0,76

Таблица Б. Значения теоретических и практических собственных частот, значения поправок  $\delta$ , добротностей  $Q$ , коэффициентов  $k$ ,  $u$  для разных параметров кубического резонатора ( $V=400 \text{ см}^3$ )

$d$ , мм	$l$ , мм	$f_{\text{теор.}}$ , Гц	$f_{\text{экс.}}$ , Гц	$Q$	$\delta$ , мм	$u$	$k$
5,57	99,5	42,3	38,9	9	18,5	6,64	3,75
5,57	70,05	50,4	45,6	7	15,8	5,68	3,21
5,57	50,96	59,1	52,6	10	13,6	4,87	2,75
5,57	30,25	76,7	67,1	9	9,4	3,36	1,90
5,57	20,09	94,2	80,4	9	7,5	2,70	1,53
5,57	11,24	125,9	101,9	9,5	5,9	2,13	1,20
9,5	128,7	63,5	58,5	9	22,6	4,76	2,69
9,5	49	102,9	92	8	12,4	2,60	1,47
9,5	29,3	133	116,9	10	8,7	1,82	1,03
9,5	18,5	167,4	137,9	10	8,8	1,85	1,05
9,5	11,56	211,8	163,8	10	7,8	1,63	0,92
14	80,35	118,4	102,4	11	27,1	3,87	2,19
14	79,43	119,0	103,7	12	25,3	3,61	2,04
14	69,7	127,1	111,3	13	21,2	3,02	1,71
14	59,35	137,7	118,1	11	21,5	3,06	1,73
14	41,6	164,5	137,9	17	17,7	2,52	1,42
14	20,5	234,4	185,8	12	12,1	1,73	0,98

Таблица В. Значения теоретических и практических собственных частот, значения поправок  $\delta$ , добротностей  $Q$ , коэффициентов  $k$ ,  $u$  для разных параметров резонатора. ( $d=14$  мм)

$V, \text{см}^3$	$l, \text{см}$	$f_{\text{теор}}, \text{Гц}$	$f_{\text{эксн}}, \text{Гц}$	$Q$	$\delta, \text{мм}$	$k$	$u$
1148,43	10	62,6	59,7	17	10,0	0,8	1,43
1148,43	8,035	69,9	65,1	18	10,9	0,87	1,55
1148,43	6,97	75,0	69,8	18	10,9	0,87	1,55
1148,43	5,935	81,3	74,7	21	10,9	0,87	1,55
1148,43	4,16	97,1	86,9	20	10,3	0,83	1,47
1148,43	2,05	138,4	104,5	23	15,5	1,24	2,20
935,06	10	69,4	66,3	15	9,5	0,76	1,35
935,06	8,035	77,4	73,2	19	9,6	0,77	1,36
935,06	6,97	83,1	79,3	18	8,9	0,71	1,27
935,06	5,935	90,1	83,9	20	9,1	0,73	1,30
935,06	4,16	107,6	97,6	19	9,0	0,72	1,28
935,06	2,05	153,3	119,7	23	13,1	1,05	1,87
807,03	10	74,7	72	18	7,5	0,60	1,07
807,03	8,035	83,3	78,9	19	9,3	0,74	1,32
807,03	6,97	89,5	84,6	20,	8,2	0,66	1,17
807,03	5,935	97,0	90,4	21	9,0	0,72	1,28
807,03	4,16	115,9	106,0	22	8,1	0,65	1,15
807,03	2,05	165,1	133,8	25	10,7	0,86	1,52
664,78	10	82,3	79,3	20	7,8	0,62	1,1
664,78	8,035	91,8	87,3	20	8,5	0,68	1,2
664,78	6,97	98,6	93,0	21	8,6	0,69	1,22
664,78	5,935	106,9	100,3	17	8,1	0,64	1,15
664,78	4,16	127,7	116,7	22	8,2	0,66	1,17
664,78	2,05	181,9	149,1	25	10,0	0,80	1,42
550,98	10	90,4	86,2	20	8,1	0,65	1,16
550,98	8,035	100,9	95,7	22	8,9	0,72	1,27
550,98	6,97	108,3	102,2	23	8,6	0,69	1,23
550,98	5,935	117,4	109,8	22	8,5	0,68	1,2
550,98	4,16	140,2	127,4	23	8,8	0,71	1,26
550,98	2,05	199,8	164	27	9,9	0,8	1,41

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Результаты работы доложены на:

- Итоговой научно-образовательной конференции студентов КФУ, Казань, 2016 г.;
- X Школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении», Казань, 13 – 15 сентября 2016 г.;
- Итоговой научно-образовательной конференции студентов КФУ, Казань, 2017 г.

Список публикаций:

1. Ветошко Р.А., Абдрашитов А.А. Исследование характеристик акустического резонатора // Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: Материалы докладов X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. Казань, 13 – 15 сентября 2016 г. – Казань: КазНЦ РАН. – 2016. – стр. 155-158. <http://elibrary.ru/item.asp?id=27321572> (РИНЦ) (дата обращения 21.06.2017)

2. Ветошко Р.А. Исследование процесса возбуждения акустического резонатора// Сборник тезисов итоговой научно-образовательной конференции студентов КФУ. – 2016. – Т 1.– стр. 171. [http://kpfu.ru/portal/docs/F79507626/326\\_12.\\_Itog..nauchno\\_obraz..konf..\\_Tezisy..T.1.\\_Blok.pdf](http://kpfu.ru/portal/docs/F79507626/326_12._Itog..nauchno_obraz..konf.._Tezisy..T.1._Blok.pdf) (дата обращения 21.06.2017)