

МИНОБРАНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

АКУСТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ ГЕЛЬМГОЛЬЦА
РЕФЕРАТ

Студента 1 курса 151 группы

Направления 09.03.04 — Программная инженерия

Факультета КНиИТ

Рыбалова Андрея Александровича

Проверено:

доцент

О. А. Черкасова

Саратов 2025

Содержание

Введение	3
Герман Гельмгольц	4
Физические основы и принцип работы резонатора Гельмгольца	6
Практические применения	9
Обзор работ	11
Заключение	15
Источники	16

Введение

Акустика – один из ключевых разделов физики, изучающий свойства звуковых волн и их взаимодействие с окружающей средой. Среди множества акустических устройств особое место занимают резонаторы Гельмгольца – простые, но эффективные конструкции, позволяющие усиливать или подавлять звуковые колебания на определённых частотах. Эти резонаторы были разработаны выдающимся немецким учёным Германом фон Гельмгольцем в середине XIX века и до сих пор находят применение в самых разных областях: от музыкальной акустики до шумоподавления в промышленности.

В данном эссе будет подробно рассмотрена физика работы резонаторов Гельмгольца, их математическое описание, исторический контекст изобретения, а также современные применения в науке и технике.

Герман Гельмгольц

Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц (1821–1894) — выдающийся немецкий физик, физиолог, психолог и врач, чьи работы заложили основы современной физиологии слуха и зрения, термодинамики, электродинамики и гидродинамики.



Ранние годы и образование

Гельмгольц родился 31 августа 1821 года в Потсдаме, Пруссия. Его отец был учителем гимназии, что повлияло на интерес Германа к науке. Несмотря на финансовые трудности, он получил медицинское образование в Военно-медицинском институте Фридриха Вильгельма в Берлине (1838–1842).

Первые научные работы

После окончания учебы Гельмгольц служил военным врачом, но продолжал заниматься наукой. В 1847 году он опубликовал работу «О сохранении силы», где математически обосновал закон сохранения энергии (первое начало термодинамики), независимо от Майера и Джоуля.

Эксперименты в физиологии

1. Измерение скорости нервного пульса (1850)

- До Гельмгольца считалось, что нервные сигналы распространяются мгновенно
- Он провел эксперименты на лягушках, раздражая нервы и измеряя время реакции мышц
- Результат: скорость нервного импульса оказалась около 27 м/с, что было революционным открытием

2. Исследования зрения и цветовосприятия (1850-1860)

- Развивая идеи Томаса Юнга, Гельмгольц разработал трехкомпонентную теорию цветового зрения (теория Юнга-Гельмгольца)
- Изучал аккомодацию глаза и изобрел офтальмоскоп (1851) для исследования сетчатки

3. Акустика и теория слуха

- В книге «Учение о слуховых ощущениях» (1863) он объяснил восприятие звуков резонансной теорией слуха
- Исследовал гармоники и комбинационные тона, заложив основы психоакустики

Последние годы и наследие

Гельмгольц преподавал в Кёнигсберге, Бонне, Гейдельберге и Берлине. В 1871 году он возглавил кафедру физики в Берлинском университете. Среди его учеников — Генрих Герц и Вильгельм Вин.

Умер 8 сентября 1894 года в Берлине. Его работы повлияли на развитие физики, физиологии, психологии и медицины. В его честь названы:

- Уравнение Гельмгольца (акустика, электродинамика)
- Резонатор Гельмгольца
- Свободная энергия Гельмгольца (термодинамика)

Гельмгольц стал одним из последних ученых-универсалов, соединившим эксперимент, теорию и практику в разных областях науки.

Физические основы и принцип работы резонатора Гельмгольца

Модель Резонатора как колебательной системы

Резонатор Гельмгольца можно рассматривать как простую пружинно-массовую систему, где:

- Столб воздуха в горловине (длиной L и площадью сечения S), выступающего в роли инерционной массы
- Объём воздуха в полости (V) действует как упругий элемент (аналог пружины).

При воздействии внешней звуковой волны воздух в горле начинает колебаться, а давление в полости изменяется, создавая возвращающую силу

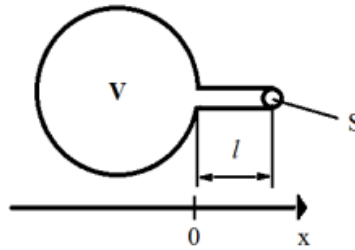


Рис. 1. Схема резонатора Гельмгольца

Уравнение колебаний

При малых амплитудах колебаний система описывается уравнением гармонического осциллятора:

$$m_{\text{эфф}} \times \frac{d^2x}{dt^2} + k_{\text{эфф}} \times x = F_{\text{внеш}}$$

Где:

- $m_{\text{эфф}}$ — эффективная масса колеблющегося воздуха
$$m_{\text{эфф}} = \rho S L \quad (\rho - \text{плотность воздуха})$$
- $k_{\text{эфф}}$ — эффективная «жесткость» воздушного объёма
$$k_{\text{эфф}} = \frac{\rho c^2 S^2}{V} \quad (c - \text{скорость звука})$$
- x — смещение воздуха в горле

Резонансная частота

Упрощённую модель резонатора Гельмгольца можно представить в виде двух цилиндров, заполненных воздухом.

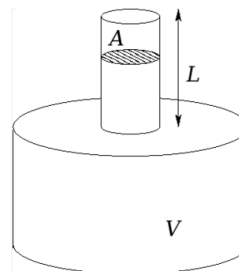


Рис. 2. Упрощенная модель резонатора Гельмгольца

Собственная угловая частота может быть выражена как:

$$\omega_0 = \sqrt{\gamma \frac{S^2 P_0}{m V_0}},$$

Где γ – показатель адиабаты, значение которого обычно равно 1.4 для воздуха и двухатомных газов; m – масса воздуха в горлышке; P_0 – статическое давление в полости; V_0 – статически объём полости

Для цилиндрических горлышек:

$$S = \frac{V_0}{L},$$

где L – длина горлышка, V_0 - объём воздуха в горлышке.

Совершим подстановку и получим:

$$\omega_0 = \sqrt{\gamma \frac{S}{m} \frac{V_0}{L} \frac{P_0}{V_0}}$$

По определению плотности

$$\frac{V_0}{m} = \frac{1}{\rho}, \text{ поэтому}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho} \frac{S}{L V_0}} \text{ и } f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \text{ где } f_0 - \text{резонансная частота}$$

Скорость звука в газах равна $v = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho}}$

Резонансная частота f_0 определяется по формуле Гельмгольца:

$$f_0 = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V_0 L_{\text{эфф}}}}$$

Где:

- v — скорость звука в газе (в воздухе ~ 343 м/с при 20°C)
- S — площадь поперечного сечения горла
- V — объём полости
- $L_{\text{эфф}}$ — эффективная длина горла (с учетом краевых эффектов).

Из-за того, что воздух на краях отверстия также участвуют в колебаниях, вводится поправка:

$$L_{\text{эфф}} = L + 0.85 \times d,$$

Где:

- d – диаметр отверстия (для круглого горла)

Принцип работы резонатора Гельмгольца

- **Фаза 1: Воздействие внешней звуковой волны**

- При попадании звуковой волны на вход горловины создаётся перепад давления ΔP
- Это вызывает движение воздушной «пробки» в горловине со скоростью v
- **Фаза 2: Сжатие/разрежение в полости**
 - При движении воздуха внутрь полости:
 - Давление в полости увеличивается
 - Создаётся возвращающая сила
 - При движении наружу:
 - Давление уменьшается
 - Возникает сила, стремящаяся вернуть воздух обратно
- **Фаза 3: Резонансный отклик**
 - При совпадении частоты внешнего воздействия с собственной частотой системы:
 - Амплитуда колебаний воздушного столба резко возрастает
 - Максимальное поглощение энергии происходит при f_0

Энергетические преобразования

1. Кинетическая энергия:
 - Сосредоточена в движущемся воздухе горловины
 - $E_k = \rho S L \frac{v^2}{2}$
2. Потенциальная энергия:
 - Связана со сжатием воздуха в полости
 - $E_p = \frac{\rho c^2 S^2}{x^2} \times \frac{x^2}{2}$
3. Диссипация энергии:
 - Вязкие потери в горловине (основной механизм поглощения)
 - Теплопередача к стенкам
 - Акустическое излучение

Термодинамические аспекты

- Адиабатический процесс в основной полости
 - Изотермический процесс вблизи стенок
 - Влияние теплопередачи на добротность:
- $$Q = \frac{2\pi f_0 E}{\Delta E}, \text{ где } \Delta E - \text{потери за период}$$

Практические применения

Акустические резонаторы Гельмгольца нашли широкое применение в различных областях науки, техники и промышленности благодаря своей способности эффективно взаимодействовать со звуковыми волнами на определенных частотах

1. Архитектурная акустика и строительство

- Контроль реверберации в концертных залах и студиях звукозаписи:
 - Резонаторы встраиваются в стены и потолки для поглощения низких частот (50-300 Гц)
 - Пример: Берлинская филармония использует регулируемые резонаторы объёмом 0,5-2 м³
 - Технические параметры: Q-фактор 10-30, эффективность до 90% на резонансной частоте
- Фасадные шумопоглощающие системы (многослойные конструкции с перфорированными панелями)
 - Толщина воздушного зазора 50-200 мм
 - Диаметр отверстий 3-10 мм с перфорацией 5-20%
 - Пример: аэропорт Шереметьево (панели снижают шум на 15 дБ в диапазоне 80-250 Гц)

2. Транспортная промышленность

- Автомобилестроение
 - Глушители выхлопных систем — некоторые конструкции используют резонаторы Гельмгольца для гашения определённых низкочастотных шумов. Они дополняют основной глушитель, устраняя резонансные частоты без значительного повышения сопротивления потоку газов
 - Шумоподавление в салоне — в дверных панелях, спойлерах или воздуховодах могут устанавливаться резонаторы для снижения дорожного и аэродинамического шума
- Авиационная техника
 - Подавление шума в турбореактивных двигателях — в авиадвигателях резонаторы могут использоваться для снижения низкочастотного гула, особенно в зоне впуска воздуха
 - Акустическая отделка салона — перфорированные панели с резонаторами уменьшают шум от обтекающего воздушного потока

3. Промышленные применения

- Вентиляционные системы (шумоглушители для промышленных воздуховодов)
 - Кольцевые массивы резонаторов вокруг основного канала
 - Материалы: нержавеющая сталь с перфорацией 8-12%
 - Эффективность: снижение шума на 20-35 дБ в диапазоне 60-400 Гц
- Энергетическое оборудование (подавление низкочастотного гула трансформаторов)
 - Подземные резонаторные камеры объёмом 10-50 м³
 - Частотный диапазон 100-400 Гц
 - Пример: подстанция «Москва-сити» использует 8 резонаторов по 25 м³

4. Медицинские технологии

- Ультразвуковая диагностика (фокусирующие насадки для аппаратов УЗИ)
 - Микрорезонаторы с диаметром горловины 0.1-0.5 мм
 - Точная настройка на частоты 1-5 МГц
 - Увеличение чувствительности на 20-40%

- Слуховые аппараты (резонансные камеры для усиления низких частот)
 - Объём 0.5-2 см³ с гибкими мембранами
 - Частотная коррекция в диапазоне 200-800 Гц

5. Военные и специальные применения

- Стелс-технологии (поглощение акустического сигнала подводных лодок)
 - Подавление шума подводных лодок – резонаторы снижают акустическую заметность
 - Маскировка звука военной техники
- Акустическое подавление дронов (системы направленного подавления)
 - Фазовые массивы резонаторов с электронным управлением
 - Мощность до 150 дБ в узком диапазоне (частоты роторов БПЛА)

6. Музыка и звуковая техника

Резонаторы Гельмгольца используются для усиления или фильтрации определённых частот:

- Гитара, скрипка и другие струнные инструменты – полости корпуса работают как резонаторы, усиливая звук
- Органные трубы, флейты и другие духовые инструменты – изменение объёма воздуха внутри и размеры отверстий меняют высоту звука

7. Бытовые применения

- Акустика домашних кинотеатров (басовые ловушки)
 - Угловые конструкции объёмом 30-100 литров
 - Поглощение в диапазоне 40-120 Гц
- Бытовая техника (шумоподавление в кондиционерах)
 - Встроенные пластиковые резонаторы объёмом 0.2-0.5 л
 - Снижение шума на 10-15 дБ на частотах 150-300 Гц

Обзор работ

1. Кезик В.И. «О возможности реализации изотермического газового процесса в резонаторе Гельмгольца»

Цель: Исследование влияния пористых материалов (меламиновая губка, поролон) на резонансную частоту резонатора Гельмгольца.

Для эксперимента был выбран вспененный меламин с малой плотностью, который был помещён в резонатор Гельмгольца. Фиксировалась резонансная частота полого резонатора и частота резонатора с меламином. Использовались два микрофона для определения резонансной частоты (рис. 3). Установка была ориентирована вертикально, с резонатором внизу.



Рис. 3. Схема экспериментальной установки Кезика В.И.

Ключевой эффект: При помещении пористого материала в полость резонатора наблюдается снижение резонансной частоты из-за перехода газового процесса с адиабатического на изотермический в порах материала.

Практическая значимость:

- Позволяет точнее проектировать резонансные звукопоглотители с пористыми наполнителями.
- Применимо в медицине (диагностика легких, где паренхима аналогична пористым материалам).

Вывод: Работа вносит значимый вклад в акустику пористых сред, предлагая методы для точной настройки резонаторов. Перспективна для задач шумоподавления и биомедицины.

Собственная оценка: работа Кезика В.И. «О возможности реализации изотермического газового процесса в резонаторе Гельмгольца» имеет большие перспективы практического применения в биомедицине.

2. М.М. Мардегалямов, А.А. Абдрашитов, Е.А. Марфин «Исследование процесса возбуждения проточного резонатора Гельмгольца с двумя горлами»

Цель: Изучение процесса возбуждения колебаний в резонаторе Гельмгольца с двумя горлами для определения его геометрических параметров и частотных характеристик, а также выявление перспектив применения устройства для волнового воздействия на продуктивные пласты.

Описание резонатора:

- Резонатор представляет собой цилиндрическую камеру с двумя соосными отверстиями (горлами) на противоположных крышках
- Отличается от классического резонатора Гельмгольца наличием двух горловых отверстий, что позволяет возбуждать его как внешним звуковым полем, так и потоком жидкости или газа.

Возбуждение резонатора проводилось двумя способами:

- С помощью "белого" шума, генерируемого динамиком, для определения собственных частот.
- Путем создания струи воздуха с помощью вакуумного насоса для изучения автоколебательного режима

Выводы:

- Теоретическая модель собственной частоты резонатора подтверждена экспериментально, но имеет ограниченный диапазон применимости.
- Определены условия эффективной работы резонатора при возбуждении струей.
- Наибольшая амплитуда колебаний достигается на первых трех модах, что связано с геометрией устройства.

Собственная оценка: полученные данные о зависимости частоты от геометрических параметров и режимах возбуждения струей могут быть полезны для:

- Развития акустических теорий – уточнения моделей резонаторов с несколькими горлами.
- Прикладных исследований – например, в задачах шумоподавления, акустической фильтрации или генерации звуковых волн.

Предложенный эксперимент имеет высокую научную ценность для акустики, но его практическая перспективность в нефтегазовой сфере пока требует дополнительных исследований.

3. Булат Г. «Резонатор Гельмгольца для камеры сгорания газовой турбины»

Цель: современные газовые турбины, работающие на обеднённых топливных смесях, склонны к динамике сгорания, что приводит к возникновению акустических шумов. Традиционные резонаторы Гельмгольца демпфируют только одну критическую частоту, что делает их неэффективными при изменении нагрузки турбины и, соответственно, температуры. Решение этой проблемы требует использования множества резонаторов с разными частотами.

Предложен резонатор Гельмгольца с адаптируемой частотой, который автоматически подстраивается под изменения температуры газовой турбины. Ключевые компоненты резонатора:

- Горловинная секция – соединяет резонатор с газовым потоком турбины.
- Камера – формирует объём резонатора.
- Деформируемый элемент – выполнен в виде биметаллической спирали, которая изменяет свою форму в зависимости от температуры.

Вывод: Изобретение предлагает инновационное решение для акустического демпфирования в газовых турбинах, сочетающее простоту конструкции с высокой эффективностью.

Собственная оценка: Адаптивный резонатор Гельмгольца позволяет значительно улучшить работу турбин, особенно в условиях переменных нагрузок и температур, что делает его перспективным для применения в энергетике и авиационной промышленности.

4. С. В. Горин, М. В. Куклин «Эффективность работы резонаторов Гельмгольца в замкнутых волноводах с жидкими рабочими средами»

Цель: оценка способности резонаторов снижать низкочастотные колебания и гидродинамический шум в гидравлических системах, что актуально для судостроения, атомной энергетики и других технических областей.

Исследования проводились на гидродинамическом стенде, включающем:

- Циркуляционный насос (ЦН-104) с регулируемыми оборотами (500–3000 об/мин).
- Трубопроводную систему с ёмкостями, клапанами и баками подпитки.
- Резонаторы Гельмгольца с фиксированными параметрами (объём полости 0.011 м³, частота собственных колебаний 197 Гц).
- Измерительное оборудование: гидрофон, усилитель и компьютерный комплекс для анализа спектров колебаний.

Резонаторы устанавливались на всасывающем и напорном участках трубопровода. Эффективность оценивалась по изменению уровней пульсаций давления на лопастной частоте насоса.

Вывод: Резонаторы Гельмгольца эффективны для снижения дискретных низкочастотных шумов в жидких средах, но только в узком диапазоне частот. Необходимо учитывать возможность усиления шума при несовпадении частот, что ограничивает применение классических резонаторов. Для практического использования требуются резонаторы с регулируемыми параметрами или демпфирующими элементами для расширения рабочего диапазона.

Собственная оценка: перспективное исследование предоставляет ценные данные для инженеров, проектирующих гидравлические системы, и подчёркивает важность точного расчёта параметров резонаторов. Результаты также могут быть полезны для разработки более универсальных глушителей шума в жидкостных средах.

5. И.В. Демьянушко, В.М. Стаин, А.В. Стаин «Применение резонаторов Гельмгольца в конструкциях шумозащитных экранов вдоль трамвайных линий»

Цель: сравнение традиционных сплошных слоёв полиуретановой пены со слоем, выполненным в виде резонаторов Гельмгольца в конструкции шумозащитных экранов вдоль трамвайных линий.

Методы исследования:

- Авторы использовали метод конечных элементов (КЭ) для моделирования акустического экрана высотой 1 м с резонаторами Гельмгольца.
- Расчёты проводились с помощью программного пакета Atran.
- Эффективность экрана оценивалась по снижению уровня шума в двух расчётных точках для частотного диапазона 200–2500 Гц.

Результаты:

- Резонаторы Гельмгольца обеспечили снижение уровня шума по сравнению со сплошным слоем полиуретановой пены.

- Экономия материала составила 35%, что делает предложенное решение не только эффективным, но и экономически выгодным.
- Наибольшее снижение шума наблюдалось в диапазоне низких частот (200–800 Гц).

Собственная оценка: предложенное решение с резонаторами Гельмгольца демонстрирует потенциал для снижения шумового загрязнения от трамваев, что перспективно для густонаселённых городов. Дальнейшие исследования, включая экспериментальную проверку и оптимизацию параметров резонаторов, могут ещё больше повысить эффективность этой технологии.

Заключение

Акустические резонаторы Гельмгольца представляют собой эффективное решение для управления звуковыми волнами на определённых частотах. Благодаря своей простоте конструкции и высокой избирательности, они нашли широкое применение в различных сферах: от архитектурной акустики и шумоизоляции до автомобилестроения, музыкальной индустрии и медицины.

Их способность поглощать или усиливать звук делает их незаменимыми для борьбы с низкочастотными шумами, улучшения акустики помещений и настройки музыкальных инструментов. Кроме того, резонаторы Гельмгольца играют важную роль в научных исследованиях и промышленных технологиях, демонстрируя универсальность и практическую значимость.

Таким образом, изучение и применение резонаторов Гельмгольца остаётся актуальным направлением в акустике, открывающим новые возможности для создания комфортной звуковой среды и совершенствования технических устройств.

Источники

1. Акустический резонатор Гельмгольца — [https://ru.ruwiki.ru/wiki/%D0%90%D0%BA%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80_\(%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80_%D0%93%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BC%D0%B3%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%86%D0%B0\)](https://ru.ruwiki.ru/wiki/%D0%90%D0%BA%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80_(%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80_%D0%93%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BC%D0%B3%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%86%D0%B0))
2. Кезик В.И «О возможности реализации изотермического газового процесса в резонаторе Гельмгольца» — <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54233111>
3. М.М. Мардегалямов, А.А. Абдрашитов, Е.А. Марфин «Исследование процесса возбуждения проточного резонатора Гельмгольца с двумя горлами» — <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30088306>
4. Булат Г. «Резонатор Гельмгольца для камеры сгорания газовой турбины» — <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37796856>
5. С. В. Горин, М. В. Куклин «Эффективность работы резонаторов Гельмгольца в замкнутых волноводах с жидкими рабочими средами» — <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17726838>
6. И.В. Демьянушко, В.М. Стаин, А.В. Стаин «Применение резонаторов Гельмгольца в конструкциях шумозащитных экранов вдоль трамвайных линий» — <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46314788>