

УДК 534.6:534.83

Влияние конфигурации связанных резонаторов Гельмгольца на их акустические характеристики в задачах снижения шума

Марфин Евгений Александрович^{1,2}marfin_ea@mail.ru
SPIN-код: 1414-1520*Абдрашитов Алексей Алланович*²abdary@mail.ru
SPIN-код: 1465-1011*Марфин Михаил Евгеньевич*^{1, 2(*)}me.marfin@gmail.com
SPIN-код: 4495-0125¹ Казанский федеральный университет, Казань, Россия² ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования конфигураций связанных резонаторов Гельмгольца, различающихся числом камер, горловин и их пространственным расположением. Показано, что число резонансных частот соосных систем определяется количеством камер, а добавление горловин смещает спектр в высокочастотную область. Установлено, что ансамбли с одинаковым числом элементов, но разной топологией связей имеют различные наборы собственных частот. Варьирование конфигурации такого ансамбля позволяет формировать требуемый спектр поглощения. Результаты могут быть использованы для проектирования акустических экранов и шумоглушителей с заданными характеристиками.

Ключевые слова: резонатор Гельмгольца, ансамбль резонаторов, частотные характеристики, собственные частоты, конфигурация системы, экспериментальное исследование

The influence of the configuration of coupled Helmholtz resonators on their acoustic characteristics in noise reduction problems

Marfin Evgeny Alexandrovich^{1,2}marfin_ea@mail.ru
SPIN-code: 1414-1520*Abdrashitov Alexei Allanovich*²abdary@mail.ru
SPIN- code: 1465-1011*Marfin Mikhail Evgenyevich*^{1, 2(*)}me.marfin@gmail.com
SPIN- code: 4495-0125¹ Kazan Federal University, Kazan, Russia² FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia

Abstract. The results of an experimental study of coupled Helmholtz resonator configurations differing in the number of chambers, throats, and their spatial arrangement are presented. It is shown that the number of resonant frequencies of coaxial systems is determined by the number of chambers, while the addition of throats shifts the spectrum toward higher frequencies. It is found that ensembles with the same number of elements but different coupling topologies have different sets of natural frequencies. Varying the configuration of

such an ensemble allows one to shape the desired absorption spectrum. The results can be used to design acoustic screens and noise suppressors with specified characteristics.

Keywords: Helmholtz resonator, resonator ensemble, frequency characteristics, natural frequencies, system configuration, experimental study

Введение. Проблема акустического загрязнения окружающей среды остается одной из острых в современном техногенном обществе. В связи с этим актуальной задачей является разработка эффективных, компактных и технологичных средств пассивного шумоглушения, способных избирательно подавлять нежелательные частотные компоненты. Одним из классических решений является резонатор Гельмгольца — колебательная система, состоящая из полости и узкого горла, характеризующийся выраженной резонансной частотой [1]. Однако традиционные одиночные резонаторы эффективны лишь в узкой полосе частот, что ограничивает их применение при борьбе со сложными спектрами шума. Значительно большими возможностями обладают ансамбли связанных резонаторов [2–6], которые позволяют влиять на несколько частот одновременно и формировать требуемую спектральную характеристику поглощения.

Современные исследования в этой области отражают быстрое развитие методов проектирования акустических систем на основе резонаторов Гельмгольца. Так, Raviola и соавторы [6] представили аналитические модели одиночных и связанных резонаторов, подтвержденные экспериментами в импедансной трубе. Комкин с соавторами [7] показали, что присоединенная длина горла зависит не только от геометрии горловины, но и от формы сечения канала, на котором закреплен резонатор; форма же самой камеры влияет на резонансную частоту меньше, что оправдывает выбор сферической камеры в настоящей работе. В более поздней работе [8] показано, что диссипативная присоединенная длина, описывающая потери энергии, необходима для расчета не только частоты, но и эффективности поглощения. Эти результаты объясняют расхождения классической теории с экспериментом, особенно при малых длинах горловин.

В работах [2] и [4] теоретически исследованы различные конфигурации массивов резонаторов — последовательные, параллельные и комбинированные. Однако большинство перечисленных исследований либо носят теоретический характер, либо сосредоточены на частных случаях соединения элементов. При этом остается недостаточно изученным вопрос о том, как топология связей (взаимное расположение камер и горловин) влияет на формирование спектра собственных частот системы. Особенно это касается экспериментальных данных, полученных на реальных физических моделях.

В настоящей работе выполнено экспериментальное исследование ансамблей связанных резонаторов Гельмгольца со сферическими камерами. Целью работы является выявление закономерностей между конфигурацией системы и ее частотными характеристиками. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: разработка лабораторной установки и методики

экспериментального исследования; создание различных моделей ансамблей, различающихся топологией связей; измерение и анализ амплитудно-частотных характеристик, определение собственных частот; сравнение полученных экспериментальных данных с теоретическими расчетами и формулирование выводов о влиянии конфигурации на резонансные свойства.

Материалы и методы. Эксперименты проведены на установке, схема которой представлена на рис. 1, а. Исследования выполнялись в шумоизолированной 2 камере размером $1,2 \times 0,8 \times 0,6$ м с поролоном 50 мм ($\alpha > 0,9$). Для минимизации отражений исследуемый резонатор 1 размещался на пенопластовой подставке в центре камеры. Возбуждение акустических колебаний осуществлялось широкополосным сигналом белого шума в диапазоне 20...20000 Гц, который формировался генератором сигналов 7 (АКИП 3408/2) и усилителем мощности 6 (Pioneer VSX-516). Акустическое излучение создавалось широкополосным динамиком 5 (TS-G1348, диаметр 130 мм), размещенным на расстоянии 0,2 м от горла резонатора. Регистрация сигналов выполнена двумя полудюймовыми измерительными микрофонами 3 (BC501) со следующими характеристиками: чувствительность — 15 мВ/Па, частотный диапазон — 50...13000 Гц. Микрофоны прошли калибровку с помощью пистонфона (BSWA CA111, уровень 94 и 114 дБ на 1000 Гц); отклонение чувствительности не превышало $\pm 0,5$ дБ. Один микрофон размещался внутри полости резонатора (фиксируясь через герметичное отверстие), второй — снаружи около входной горловины на расстоянии 0,2 м от динамика. Сигналы с микрофонов подавались на спектроанализатор 4 ZET 017-U4 (АЦП 24 бит) и далее на ПК 8.

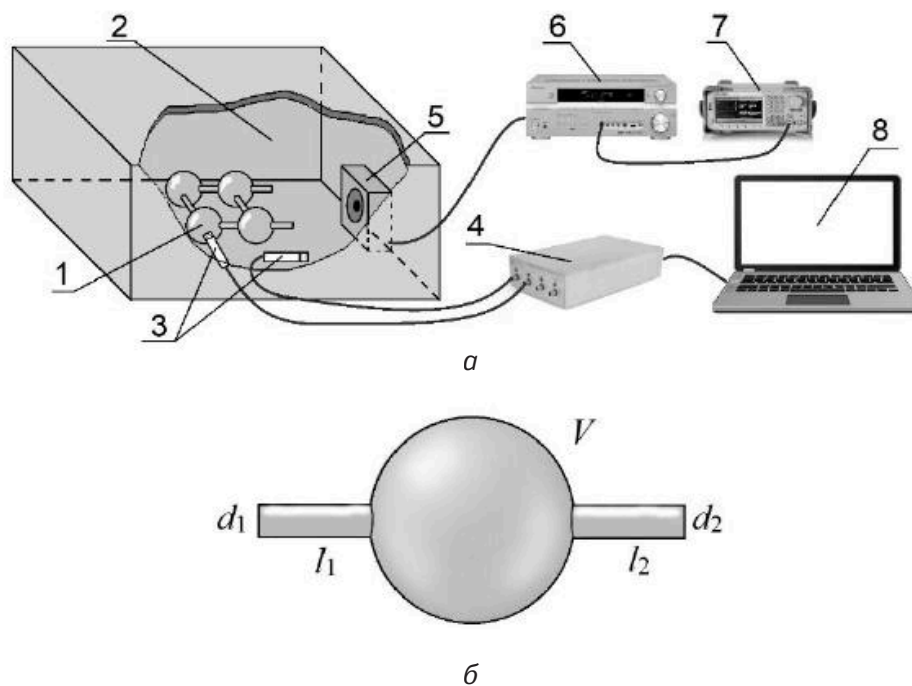


Рис.1. Схема (а) экспериментальной установки и (б) резонатора Гельмгольца с двумя горловинами

Запись производилась фрагментами длительностью 10 с, что соответствует более 100 периодам для низшей исследуемой частоты 50 Гц. Для каждого режима выполнялось 5 последовательных записей. Обработка выполнена в среде Matlab R2020a. Из каждого фрагмента удалялись первые 0,5 с для исключения переходных процессов. Вычислялось БПФ с числом точек 2^{17} и частотой дискретизации 44,1 кГц. Для каждого микрофона рассчитывался усредненный амплитудный спектр (среднее арифметическое по 5 фрагментам). Затем строилась передаточная функция (коэффициент усиления) как отношение спектральной плотности сигнала внутри резонатора к спектральной плотности сигнала снаружи:

$$K(f) = Y_{\text{внутр}}(f)/Y_{\text{внеш}}(f) \quad (1)$$

Анализ выполнялся в диапазоне частот от 20 Гц до 2 кГц, что охватывало все ожидаемые резонансные частоты (максимальная экспериментальная частота не превышала 700 Гц). Резонансные частоты определялись по пикам на кривой $K(f)$ с погрешностью $\pm 0,5$ Гц.

Резонаторы, схема одного из них представлена на рис. 1, б, изготовлены из пластика (толщина стенки 2 мм) со сферическими камерами объемом 110 см³ (для ансамблей) и 297 см³ (для одиночных и двухгорловых). Горловины — цилиндрические, внутренний диаметр 14 мм, длина варьировалась от 20,5 до 79,4 мм. Всего собрано 75 конфигураций ансамблей, различающихся числом камер (от 1 до 5), числом горловин (от 1 до 6) и топологией связей (соосные, угловые (90°), разветвленные). Для каждой конфигурации проведено не менее трех независимых измерений, результат представлен как среднее арифметическое. Относительная погрешность определения резонансной частоты не превышала 2,5 %. Теоретические частоты вычислялись по формулам из работы [1]. Для резонатора Гельмгольца с двумя горлами формула резонансной частоты имеет вид [1]:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{V} \left(\frac{d_1^2}{l_1^*} + \frac{d_2^2}{l_2^*} \right)} \quad (2)$$

Результаты. Выбор формы камеры. На предварительном этапе сравнивались резонаторы с двумя горловинами, имеющие сферическую, кубическую и цилиндрическую камеры примерно одинакового объема. Для сферической камеры АЧХ содержала один четкий резонансный пик, хорошо описываемый классической формулой. Сферическая показала наименьшее расхождение с теорией (2,5...14 % против 24 % у цилиндрической). В связи с этим для всех дальнейших исследований ансамблей выбрана сферическая форма камеры.

Соосные ансамбли представляют собой колебательные системы, в которых камеры соединены последовательно горловинами, расположенными на одной оси. Установлено, что число резонансных пиков на АЧХ равно числу камер в ансамбле. При добавлении к одиночному резонатору (1 камера, 1 горло) второго горла (1 камера, 2 горла) экспериментальная собственная

частота возрастает с 258 Гц до 362 Гц, что соответствует теоретическому отношению $\sqrt{2}$. Добавление новой камеры (например, переход от 1 камеры и 2 горловин к 2 камерам и 2 горловинам) приводит к появлению дополнительного низкочастотного пика (146 Гц) при сохранении более высокочастотного пика (394 Гц). Аналогичная закономерность сохраняется при увеличении числа камер до 5: каждая новая камера добавляет один резонансный пик в низкочастотную область спектра.

Влияние добавления горловин в соосных ансамблях. Для фиксированного числа камер увеличение количества горловин (при сохранении соосной топологии) вызывает повышение всех собственных частот системы. Так, для ансамбля из двух камер добавление третьей горловины сдвигает частоты со 146/394 до 240/423 Гц. АЧХ этих камер представлены на рисунке 2. Для пяти камер добавление шестой горловины повышает все пять частот (например, низшая мода с 56 до 127 Гц, высшая — с 481 до 499 Гц). Этот эффект объясняется уменьшением эффективной акустической массы системы при увеличении числа параллельных путей для колебательного движения воздуха.

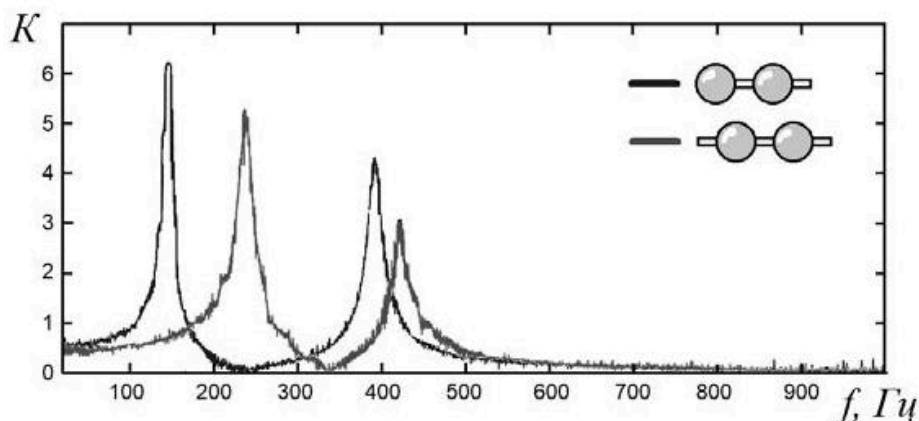


Рис. 2. Сравнение АЧХ для соосных ансамблей с разным числом горловин

Конфигурации с угловым расположением горловин. Для резонатора с одной камерой и двумя горловинами, расположенными под углом 90° , собственная частота составила 406 Гц, что заметно выше, чем для соосного расположения тех же горловин (362 Гц). При этом резонансный пик становится более широким, что указывает на изменение добротности системы. Добавление третьей и четвертой горловин на той же камере (при сохранении углового расположения) последовательно повышает частоту до 448 и 470 Гц соответственно.

Влияние топологии связей при одинаковом числе элементов. Наиболее значимый результат получен при сравнении ансамблей, содержащих одинаковое количество камер и горловин, но различающихся пространственной конфигурацией. Для случая 3 камер и 4 горловин соосная цепочка (камеры последовательно соединены) дает три резонансных пика на частотах 181, 347 и 452 Гц. Разветвленная конфигурация (с боковым присоединением третьей камеры) при

тех же 3 камерах и 4 горловинах демонстрирует только два пика — 172 и 520 Гц. Аналогично, для 4 камер и 5 горловин соосная система имеет четыре пика (152, 286, 396, 481 Гц), тогда как пространственно-разветвленная конфигурация с тем же набором элементов дает три пика (145, 391, 520 Гц). Таким образом, топология связей является самостоятельным фактором, определяющим спектр собственных частот наряду с количеством элементов.

Влияние положения микрофона. В сложных разветвленных ансамблях при перемещении измерительного микрофона из одной камеры в другую амплитуды резонансных пиков изменяются, однако сами резонансные частоты остаются неизменными (расхождение не превышает 2 %). Это подтверждает, что зафиксированные частоты являются собственными частотами системы в целом, а не локальными резонансами отдельных камер.

Обсуждение. Полученные экспериментальные результаты позволяют выявить физические механизмы, определяющие поведение ансамблей связанных резонаторов Гельмгольца. Наблюдаемое увеличение собственных частот при добавлении горловин объясняется уменьшением эффективной акустической массы системы: дополнительные горловины создают параллельные пути для колебательного движения воздуха, снижая инерционное сопротивление. Повышение частот при угловом расположении горловин (362 → 406 Гц) обусловлено изменением присоединенной длины из-за асимметрии поля скоростей у входа в горловины. Появление новой низкочастотной моды при добавлении камеры соответствует возникновению дополнительной степени свободы в системе распределенных параметров.

Сравнение с теорией показывает, что для простейших случаев (1–2 камеры) классические формулы (4) и (5) из работы [1] обеспечивают удовлетворительное совпадение с экспериментом (расхождения 2...14 %). Однако для сложных ансамблей (3 и более камер, разветвленные топологии) эти модели недостаточны, поскольку не учитывают перекрестные связи между элементами. Более адекватным представляется метод электромеханических аналогий для многомерных систем, а также подход на основе передаточных матриц, использованный Cai и Mak [4] для анализа параллельных и последовательных массивов резонаторов. Следует отметить, что в работе [4] было показано, что частоты резонансного поглощения различных конфигураций массивов могут существенно различаться даже при одинаковом количестве элементов, что полностью согласуется с нашими выводами о влиянии топологии связей. Аналогичные результаты получены Xu и соавторами [2] для двойного резонатора, где авторы экспериментально подтвердили, что комбинация двух последовательно соединенных резонаторов дает две резонансные частоты, определяемые геометрическими параметрами. Raviola с коллегами [5] также исследовали связанные резонаторы и продемонстрировали, что при использовании поправок на эффективную длину горловин погрешность расчета частот не превышает 5 %. В настоящей работе для сложных конфигураций расхождения с теорией достигали 14...24 %, что объясняется более сильным взаимным влиянием горловин в компактных ансамблях. Zhao и соавторы [6] предложили использовать глу-

бокое обучение для прогнозирования акустических характеристик резонаторных систем, что открывает перспективы для проектирования сложных ансамблей без необходимости построения полной аналитической модели. Wu с коллегами [9] применили генетический алгоритм для оптимизации метаматериалов на основе вложенных резонаторов, достигнув эффективного низкочастотного шумоглушения. Yang и соавторы [10] показали, что слабая связь между параллельными резонаторами может быть использована для расширения полосы поглощения, что согласуется с нашим наблюдением об уширении пика при угловом расположении горловин.

Ограничения настоящего исследования связаны с фиксированными значениями объема камер (110 и 297 см³) и диаметра горловин (14 мм). Влияние масштабного фактора требует отдельного изучения, как и поведение ансамблей в других газовых средах или при повышенных температурах.

Прикладное значение полученных результатов заключается в возможности проектирования шумоглушающих конструкций с заданным числом и положением полос поглощения путем изменения не только размеров отдельных резонаторов, но и конфигурации их взаимных связей. Это особенно важно для создания компактных многодиапазонных акустических экранов и глушителей для городской и производственной среды, где требуется подавление нескольких дискретных частот при ограниченных габаритах.

Заключение. В ходе экспериментального исследования ансамблей связанных резонаторов Гельмгольца установлено, что конфигурация системы (число камер, горловин и топология связей) определяет ее частотные характеристики. Основным новым результатом является то, что ансамбли с одинаковым числом камер и горловин, но различающиеся топологией (соосная цепочка против разветвленной структуры), демонстрируют разное количество и значения резонансных частот. Это расширяет возможности проектирования многокомпонентных резонаторных систем.

Полученные данные имеют практическую значимость для разработки компактных многодиапазонных шумоглушителей и акустических экранов, где требуемый спектр поглощения может быть реализован не только за счет геометрии отдельных элементов, но и за счет выбора пространственной схемы их соединения. В научном плане результаты служат основой для валидации численных методов (передаточных матриц, конечно-элементного моделирования) и могут быть использованы при построении физических моделей пористых сред как ансамблей взаимосвязанных пор-резонаторов. Перспективы дальнейших исследований включают изучение масштабных эффектов и создание ансамблей с неодинаковыми параметрами камер и горловин для управления шириной полосы поглощения.

Список источников

- [1] Комкин А.И. Миронов М.А., Быков А.И. Поглощение звука резонатором Гельмгольца *Акустический журнал*, 2017, т. 63, № 4, с. 356–363.
<https://doi.org/10.7868/S0320791917030078>

- [2] Xu M.B., Selamat A., Kim H. Dual Helmholtz resonator. *Applied Acoustics*, 2010, vol. 71, no. 9, pp. 822–829. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.04.007>
- [3] Yang Q., Li Z., Yang D., Zhu M. An Analysis and Optimum Design of the Weak Coupling Between Cavities for Broadband Sound Absorption of Parallel Helmholtz Resonators, *Journal of Vibration and Acoustics*, 2025, vol. 147, no. 6, art. no. 061005. <https://doi.org/10.1115/1.4069080>
- [4] Cai C., Mak C.M. Acoustic performance of different Helmholtz resonator array configurations. *Applied Acoustics*, 2018, vol. 130, pp. 204–209. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.09.026>
- [5] Raviola L.A., Gómez B.J., Novara I., Roatta A., Repetto C.E. Theoretical and experimental study of coupled Helmholtz resonators. *European Journal of Physics*. 2025, vol. 46, no. 5, art. no. 055803. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/adf8a3>
- [6] Zhao Y., Yan G., Ma Z., Tang S. Deep learning for performance prediction and inverse design of Helmholtz resonators, *Physica Scripta*, 2026, vol. 101, no. 11, art. no. 116003. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ae4f2f>
- [7] Комкин А.И., Миронов М.А., Юдин С.И. О присоединенной длине отверстий. *Акустический журнал*, 2012, т. 58, № 6, с. 677–682. <https://doi.org/10.1134/S1063771012060076>
- [8] Комкин А.И. Резонатор Гельмгольца в свете становления и развития акустической науки. *Акустика среды обитания. X Всерос. конф. молодых ученых и специалистов: матер.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025, с. 5–20.
- [9] Wu L., Zhai Z., Zhao X., Tian X., Li D., Wang Q., Jiang H. Modular design for acoustic metamaterials: low-frequency noise attenuation. *Advanced Functional Materials*, 2022, vol. 32, no. 13, art. no. 2105712. <https://doi.org/10.1002/adfm.202105712>
- [10] Yang H., Han J., Zhan W., Yang C., Zhou J., Bu H. Development of an ultra-thin acoustic metamaterial for noise mitigation: Concept to ducted propeller applications. *Aerospace Science and Technology*, 2026, vol. 168, part E, art. no. 111121. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2025.111121>