УДК 520.607

Оценка поглощения звука резонатором Гельмгольца

Быков Алексей Иванович[1(*)] alecksbykov@mail.ru
SPIN-код: 2686-5097

Комкин Александр Иванович[1] akomkin@mail.ru
SPIN-код: 5661-1528

Миронов Михаил Арсеньевич[1, 2] mironov_ma@mail.ru

[1] МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

[2] Акустический институт им. Н.Н. Андреева, Moscow, Russia

Аннотация. Приведены результаты оценки поглощения звука торцевым резонатором Гельмгольца. Получены коэффициенты поглощения звука от частоты в зависимости от геометрических конфигураций. Аналитические оценки сделаны с учетом вязкого терния на стенках и тепловых потерь в полости резонатора. Показаны результаты моделирования поглощения звука торцевым резонатором Гельмгольца в программной среде COMSOL Multiphysics с учетом термовязкостных эффектов в среде. Предстиавлены результаты экспериментальных измерений поглощения звука резонатором Гельмгольца на основе метода с использованием двух микрофонов. Выполнено сравнение численных и экспериментальных результатов исследования с аналитическими оценками.

Ключевые слова: резонанс, вязкое трение, горло, импеданс, численное моделирование, эксперимент

Evaluation of sound absorption by a Helmholtz resonator

Bykov Aleksei Ivanovich[1(*)] alecksbykov@mail.ru
SPIN-code: 2686-5097

Komkin Alexandr Ivanovich[1] akomkin@mail.ru
SPIN-code: 5661-1528

Mikhail Arsenyevich Mironov[1, 2] mironov_ma@mail.ru

[1] BMSTU, Moscow, Russia

[2] Andreyev Acoustics Institute, Moscow, Russia

Abstract. The article presents the results of an evaluation of sound absorption by a Helmholtz resonator, as well as the coefficients of sound absorption at different frequencies depending on the geometric configuration. Analytical estimates were made, taking into account the viscosity on the walls and heat losses in the resonator cavity. The results of modeling of sound absorption by a Helmholtz end resonator using the COMSOL Multiphysics software, which takes into account thermo-viscous effects in the medium, are presented. Experimental measurements of sound absorption using a Helmholtz resonator method based on two microphones were also conducted. The numerical and experimental findings are compared with the analytical estimates.

Keywords: resonance, viscosity, neck, impedance, numerical simulation, experiment

Введение. Определение поглощения звуком резонатором Гельмгольца имеет большое значение для успешного использования такого резонатора на практике. Впервые обстоятельное рассмотрение этого вопроса было осуществлено Ингардом в его классической работе 1953 года [1]. Как показал проведенный им анализ, поглощение звука резонатором Гельмгольца при его аналитической оценке целесообразно определять вязкими потерями в горле и на передней стенке резонатора, а также тепловыми потерями на стенках полости резонатора. Получить достоверные теоретические оценки этих составляющий потерь сложно [2–4], и поэтому они должны быть подкреплены экспериментально, что и было отчасти сделано в [5, 6]. В [7] были приведены результаты экспериментальных исследований, по которым видно, что представленных аналитических оценок потерь в горле недостаточно, чтобы привести поглощение звука в торцевом резонаторе в соответствие к эксперименту. С этой целью в этой работе авторами был введен дополнительный параметр, учитывающий потери на кромке горла, они предположили, что из-за сложного движения среды в окрестности горла могут иметь место неучитываемые аналитикой потери. Однако, уверенной интерпретации полученных результатов тогда не было достигнуто и вопрос требовал более подробного изучения. Следует отметить, что до недавнего времени расчет поглощения резонатора методом конечных элементов с учетом термовязких потерь в резонаторе был очень трудоемким и применялся нечасто. Однако в известном программном пакете COMSOL Multiphysics появилась новая возможность оперативного решения подобного рода задач, и она начала широко использоваться, например в [8]. Настоящая работа является продолжением работы авторов по исследованию акустических характеристик резонатора Гельмгольца [3, 4, 7]. Задачей данной работы явилась сравнительная оценки поглощения резонатора Гельмгольца с помощью трех различный методов.

Методы исследования. В данной статье работа велась по трем основным направлениям исследований: аналитическая оценка, численное моделирование и эксперимент. Сразу стоит отметить, что аналитическое представление резонатора не претерпело изменений по сравнению с [6]. Стоит отметить, что вязкие потери в горле и на стенках, а также тепловые потери в резонаторе Гельмгольца являются определяющими.

Второе направление исследования направлено на численной моделирование. Для этих целей был использован программный комплекс COMSOL Multiphysics. Моделирование проводилось с использованием физических модулей «Pressure Acoustics, Frequency Domain» и «Thermoviscous Acoustics, Frequency Domain».

Осесимметричные модели включали в себя торцевой резонатор и цилиндрический волновод. Излучение задавалось плоской полной с торца, противоположному резонатору. Разбиение модели на конечные элементы было привязано к размеру термовязкостного слоя так, что пограничный слой у стенок был разбит на 8 слоев толщиной от 5 до 10 мкм. В целом число конечных

элементов в плоской осесимметричной модели лежало в районе $3 \cdot 10^5$. При моделировании все поверхности считались абсолютно жесткими. Схематично численные модели представлены на рис. 1, где L — глубина полости резонатора, d_0 — диаметр горла резонатора, d — диаметр полости резонатора и волновода слева от него, l — толщина горла резонатора. Эти параметры варьировались в процессе моделирования.

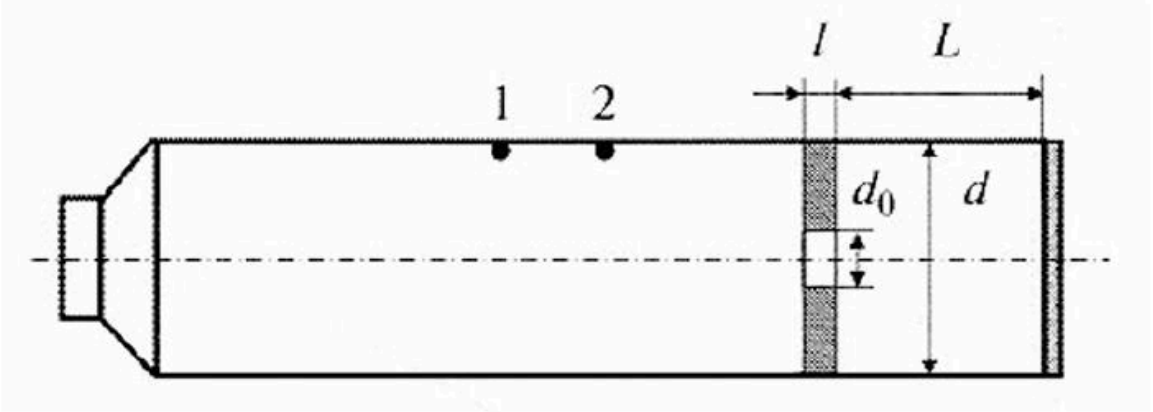


Рис. 1. Схематичное представление численных моделей

На схеме обозначения 1 и 2 соответствуют точкам, в которых по результатам численных расчетов определялось комплексные амплитуды звуковых волн в импедансной трубе, из которых затем выделялись амплитуды, падающей на резонатор и отряженной от него звуковых волн.

Эксперимент проводился на импедансной трубе с внутренним диаметром 99 мм, как в упомянутых выше моделях. Динамик излучал ЛЧМ-сигнал в диапазоне от 50 до 500 Гц с временем реализации 1 с. Уровень сигнала был подобран таким образом, чтобы влияние нелинейностей на работу резонатора было несущественным. Используемый метод измерений с двумя микрофонами достаточно подробно описан в [3].

Результаты. На рис. 2 представлены зависимости коэффициента поглощения резонатора α от частоты, полученные аналитически и в результате численного моделирования для резонатора со следующими геометрическими параметрами L = 40 мм, l_0 = 10 мм, d_0 = 10 мм.

Максимум поглощения каждой линии, очевидно, соответствует собственной частоте резонатора. Точечная и сплошная линии представляют аналитические оценки, отличие между которыми обусловлено тем, учитывались ли тепловые потери в среде или нет наряду с вязкими. Так, для линии с большим поглощение импеданс на собственной частоте определяется суммой вязких R_v и тепловых R_χ потерь, а для точечной — только R_v. Две кривые, представленные на рисунке штриховой и штрихпунктирной линией получены моделированием методом конечных элементов, они лежит ровно между упомянутыми ранее аналитическими оценками. При этом штриховая линия соответствует учету термовязкостных эффектов в горле резонатора, на передней стенке, на которой расположено горло, и в полости резонатора, а штрих-пунктирная — только в горле и на стенке с горлом.

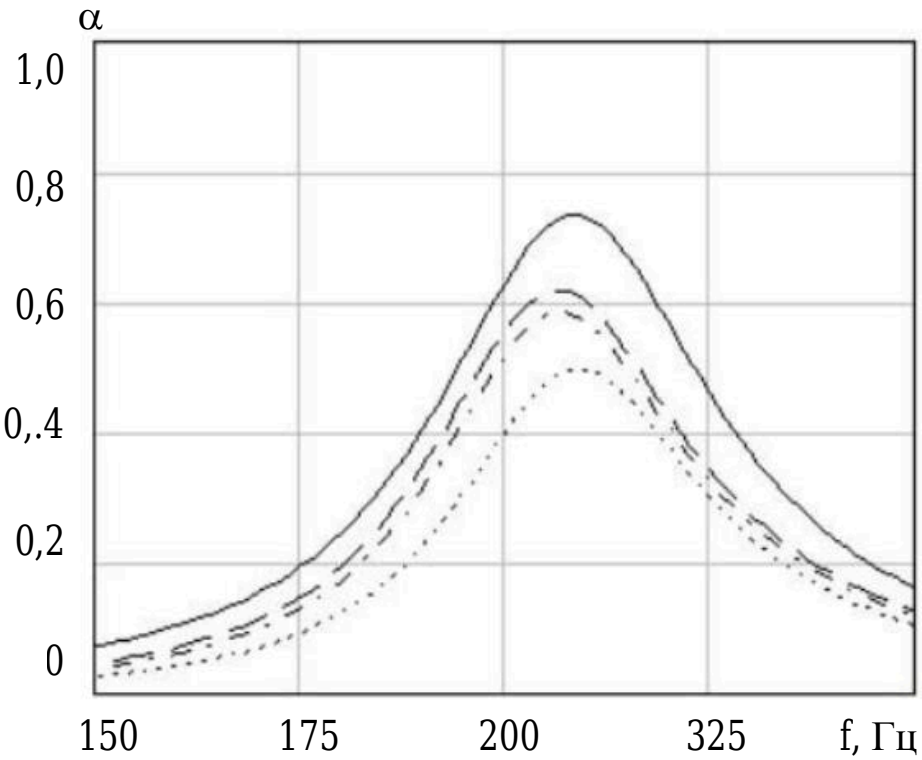


Рис. 2. Поглощение звука торцевым резонатором Гельмгольца: (– – –) — аналитическая оценка с учетом вязких и тепловых потерь; (·····) — аналитическая оценка с учетом вязкого трения, без учета тепловых потерь; (– –) — оценка на основе конечно-элементного моделирования с учетом термовязкостной физики во всем резонаторе; (– –) — оценка на основе конечно-элементного моделирования с учетом термовязкостной физики только в окрестности горла и на передней стенке резонатора

Далее были получены зависимости α для резонаторов с различной длиной горла l_0 при L = 40 мм и d_0 = 10 мм, результаты представлены на рис. 3. Отметим, что аналитическая оценка учитывает и тепловые, и вязкие потери. Примечательно, что с увеличением длины горла увеличивается и расхождение между результатами аналитической и численной оценки.

На рис. 4 представлены кривые поглощения звука, полученные экспериментально (штриховая линия) и аналитически (сплошная линия) с учетом тепловых и вязких потерь для резонаторов с длиной горла l_0 = 10 мм, диаметром горла d_0 = 10 мм и изменяемой глубиной полости L. Одна из кривых на рис. 4 имеет заметную шероховатость, по-видимому, из-за существенно меньшего периода осреднения. Впрочем, принципиально этот недостаток никак не меняет суть. Поглощение резонатора с глубиной полости L = 40 мм полученное экспериментально весьма неплохо соотносится с аналитической оценкой, а с уменьшением глубины полости начинает расходиться. Это не кажется удивительным, ведь при диаметре горла резонатора d_0 = 10 мм и глубине L = 15 мм задняя стенка полости находится очень близко к горлу, где воздух совершает наиболее активные осцилляции — это, по-видимому, и приводит к увеличению вязких потерь на стенках полости резонатора.

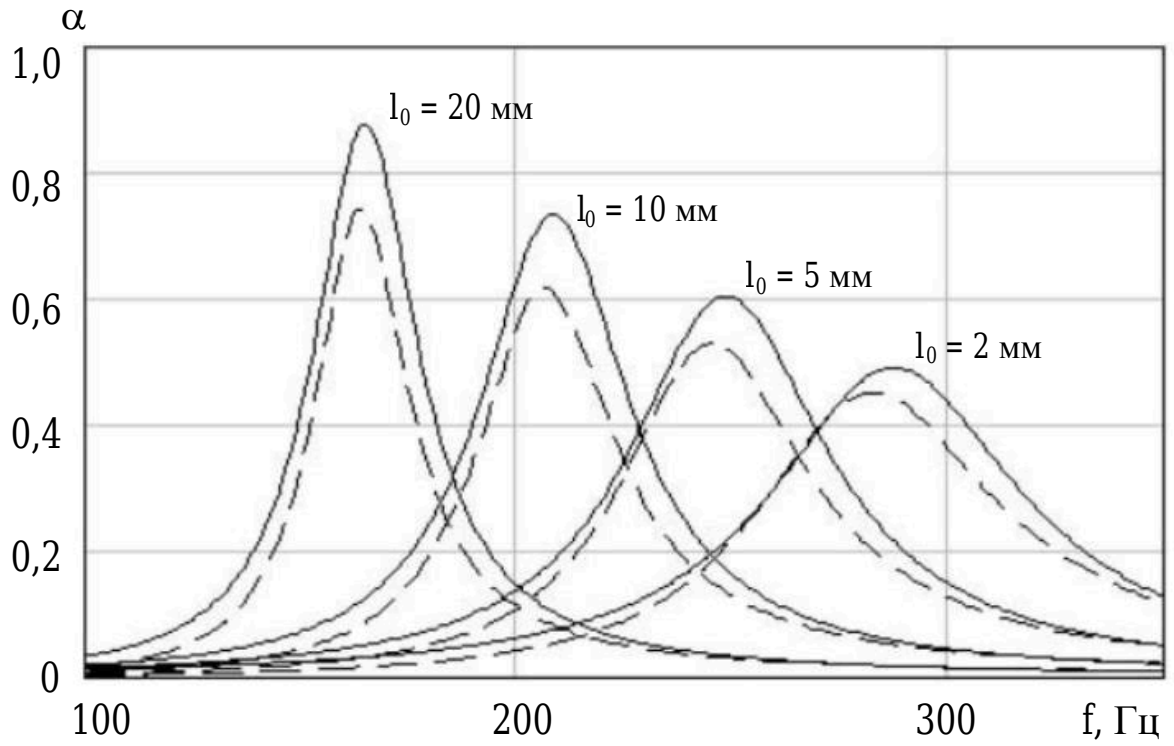


Рис. 3. Поглощение звука торцевым резонатором Гельмгольца при различных длинах горла l_0: (– – –) — аналитическая оценка с учетом вязких и тепловых потерь; (– –) — оценка на основе конечно-элементного моделирования

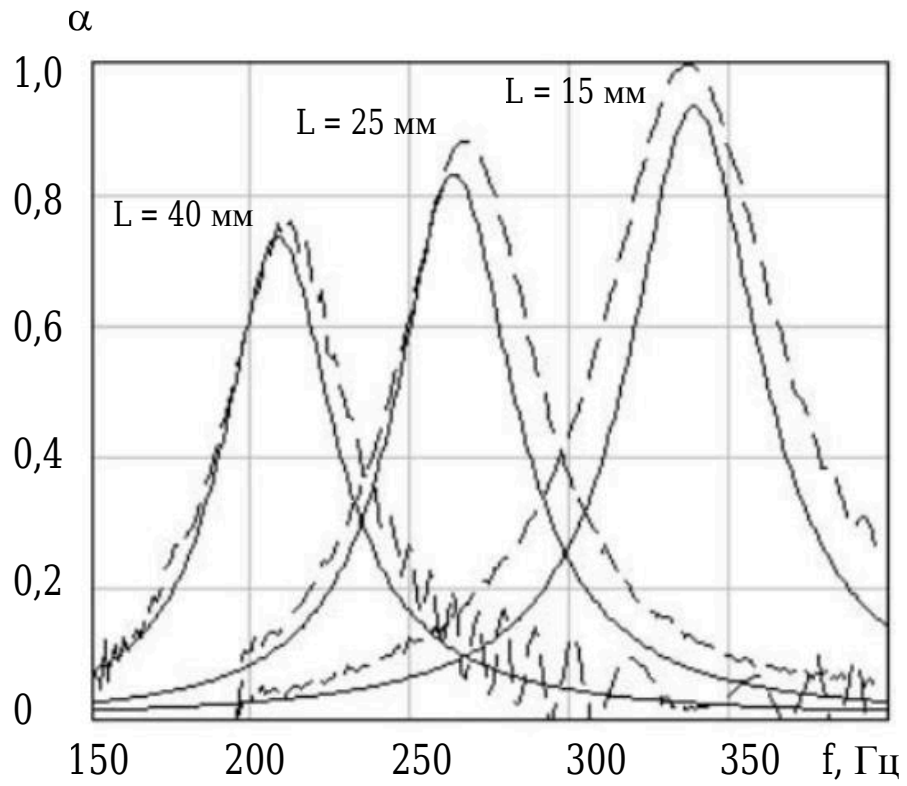


Рис. 4. Поглощение звука торцевым резонатором Гельмгольца в зависимости от глубины полости резонатора L; (– – –) — эксперимент, (– –) — аналитическая оценка

Обсуждение. В данной работе полученные экспериментально зависимости поглощения торцевыми резонаторами выше аналитических оценок, а значит и существенно выше численных. На каждом из приведенных в работе рисунков присутствуют линии поглощения, которые соответствуют резонатору со следующими геометрическими параметрами $L = 40$ мм, $l_0 = 10$ мм, $d_0 = 10$ мм. По представленным результатам видно, что в проведенной серии измерений и расчетов аналитическая оценка лучше соответствует эксперименту, чем численное моделирование, хотя зачастую и в аналитике потери не учтены в достаточной мере. Вероятно численное моделирование просчитывает меньшие вязкие и тепловые потери, чем они есть в действительности. Причина такому положению дел не очевидна, однако, важно заметить, что численно моделирование тем лучше сходится с аналитикой, чем тоньше горло резонатора. Кроме того, приведенная в работе серия измерений и расчетов касается только горла резонатора диаметром 10 мм, это важно отметить в виду того, что возможно при уменьшении общей площади поверхности горла сходимость с аналитикой у конечного моделирования может возрасти.

Вторым показательным результатом является то, что расхождения между линиями поглощения, полученными численным методом и представленные на рис. 2, не велико. Предполагается, что вязкие потери имеют место быть в первую очередь на передней стенке, в горле и на стенках полости резонатора, в то время как тепловые потери присутствуют в самом объеме полости. Суда по результатам аналитических расчетов тепловые потери в полости вносят существенный вклад в результат, в то время как численно моделирование говорит нам о том, что сама полость резонатора не так уж и важна для определения коэффициента поглощения.

Заключение. Исследование показало: пока, численные, аналитические и экспериментальные оценки все еще существенно расходятся друг с другом при варьировании геометрических параметров резонатора Гельмгольца, а значит требуют внимательного изучения до выяснения реальных предпосылок получения представленных результатов. А на данный момент по проделанной работе можно заключить, что аналитические оценки в целом не далеки от экспериментальных измерений, а численное моделирование тем ближе к аналитике, чем тоньше горло резонатора.

Список источников

[1] Ingard U. On the theory and design of acoustic resonators. J. Acoust. Soc. Am. 1953, vol. 25, no. 6, pp. 1037–1061.

[2] Davis A.M.J., Nagem R.J. Influence of viscosity on the diffraction of sound by a circular aperture in a plane screen. J. Acoust. Soc. Am. 2003, vol. 3, no. 6, pp. 3080–3090.

[3] Комкин А.И., Миронов М.А. Характеристики поглощения резонатора Гельмгольца. *Ученые записки физического факультета МГУ*. 2014, № 6, 146304.

[4] Комкин А.И., Миронов М.А. О диссипативной присоединенной длине отверстия перегородки в круглом канале. *Акуст. журн*. 2015, т. 61, № 4, с. 442–446.
[5] Велижанина К.А., Вощукова Е.А., Свирина Л.Д. Влияние потерь в объеме резонатора на его акустические характеристики. *Акуст. журн*. 1985, т. 31, № 3, с. 386–388.
[6] Tang S.K., Ng C.H. Lam E.Y.L. Experimental investigation of the sound absorption performance of compartmented Helmholtz resonators. Appl. Acoust. 2012, vol. 73, no. 9, pp. 969–976.
[7] Komkin A. I., Mironov M. A., Bykov A. I. Sound absorption by a Helmholtz resonator. *Акуст. журн*. 2017, т. 63, с. 356-363.
[8] Gautam A., Celic A., Azarpeyvad M. Low-frequency-noise attenuation through extended-neck double-degree-of-freedom Helmholtz resonators. Acoustics. 2123, no. 5, pp. 1123–1135.