

МЕХАНИКА

Научная статья

УДК 533.6; 534.2; 534.6, PACS 43.55.Dt

DOI: 10.17072/1993-0550-2026-1-51-59

<https://elibrary.ru/jmigmy>



**Исследование акустических характеристик резонатора
экспериментальным методом и численным моделированием**

**Виталий Герасимович Зидыганов¹, Александр Александрович Синер²,
Виталий Анатольевич Демин³**

^{1, 2, 3} Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

^{1, 2} АО "ОДК-Авиадвигатель", Пермь, Россия

¹zidyganov-vg@avid.ru

²siner@avid.ru

³demin@psu.ru

Аннотация. В работе экспериментально и методом численного моделирования исследуются акустические характеристики резонатора Гельмгольца с использованием двухмикрофонного метода передаточной функции. Эксперимент проводился в лаборатории аэродинамики ПГНИУ на установке, центральным элементом которой является импедансная труба. В рамках эксперимента определялись импеданс и коэффициент звукопоглощения, которые затем сравнивались с результатами математического моделирования, выполненного численно методом конечных элементов в пакете ЛОГОС Аэро-Гидро. В наиболее востребованном для практики диапазоне частот получено удовлетворительное согласие расчетов и экспериментальных данных.

Ключевые слова: акустика; звукопоглощающие конструкции; эксперимент.

Для цитирования: Зидыганов В. Г., Синер А. А., Демин В. А. Исследование акустических характеристик резонатора экспериментальным методом и численным моделированием // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2026. № 1(72). С. 51–59. DOI: 10.17072/1993-0550-2026-1-51-59. <https://elibrary.ru/jmigmy>.

Статья поступила в редакцию 10.01.2026; одобрена после рецензирования 06.03.2026; принята к публикации 20.03.2026.



© Зидыганов В. Г., Синер А. А., Демин В. А., 2026
Лицензирован по CC BY 4.0. Чтобы посмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

MECHANICS

Research article

The Study of Acoustic Characteristics of a Resonator by Experimental Method and Numerical Simulation

Vitalii G. Zidyganov¹, Alexander A. Siner², Vitalii A. Demin³

^{1,2,3} Perm State University, Perm, Russia

^{1,2} UEC-Aviadvigatel JSC, Perm, Russia

¹zidyganov-vg@avid.ru

²siner@avid.ru

³demin@psu.ru

Abstract. This paper examines the acoustic characteristics of a Helmholtz resonator experimentally using a two-microphone transfer function method and numerical modeling. The experiment was conducted in the Perm State University in Aerodynamics Laboratory using a set-up whose central element is an impedance tube. The impedance and sound absorption coefficient were determined during the experiment and then compared with the results of mathematical modeling performed numerically using the finite element method in the LOGOS Aero-Hydro package. Satisfactory agreement between the calculations and experimental data was achieved in the frequency range most commonly used in practice.

Keywords: acoustics; sound-absorbing structures; experiment.

For citation: Zidyganov, V. G., Siner, A. A. and Demin, V. A. (2026), "The Study of Acoustic Characteristics of a Resonator by Experimental Method and Numerical Simulation", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no 1(72), pp. 51–59, DOI: 10.17072/1993-0550-2026-1-51-59, <https://elibrary.ru/jmigmy>.

The article was submitted 10.01.2026; approved after reviewing 06.03.2026; accepted for publication 20.03.2026.

1. Постановка задачи

В связи с ужесточением международных требований по шуму на местности для самолетов с турбореактивными двигателями проявляется повышенный интерес к различным мероприятиям, направленным на снижение шума авиадвигателей. Наиболее эффективным средством снижения шума являются резонансные сотовые звукопоглощающие конструкции (ЗПК). При создании звукопоглощающих конструкций авиационного двигателя широко используются резонаторы Гельмгольца. Ячейки сотовых ЗПК представляют собой отдельные резонаторы такого типа.

Для определения акустических характеристик ЗПК существуют различные экспериментальные методы [1–4]. Экспериментальное определение акустических характеристик проводится в акустических интерферометрах, в канале с потоком, в реверберационных камерах. Измерения как правило проводятся в диапазоне частот, при которых в установках распространяются только плоские волны. Экспериментальные значения акустического давления обрабатываются математическими процедурами. В данной работе используется интерферометр с нормальным падением звуковых волн и стандартизированный двухмикрофонный метод передаточной функции [2, 5]. Принципиальная схема интерферометра изображена на рис. 1.

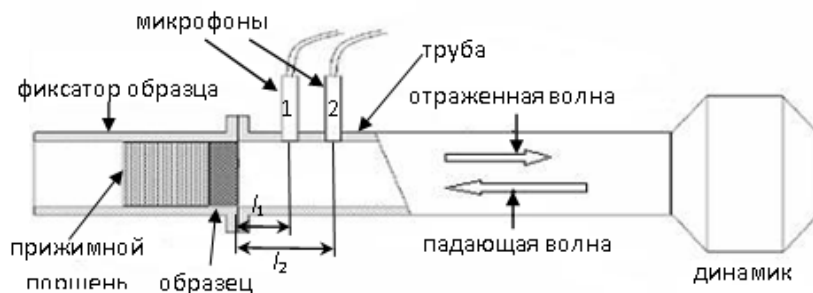


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Импедансная труба

Интерферометр состоит из трубы с толстыми стенками, двух микрофонов, динамика и фиксатора испытуемого образца. В начале трубы установлен динамик, возбуждающий звуковые колебания. В конце трубы закрепляется испытуемый образец ЗПК. Данный экспериментальный метод не позволяет детально проанализировать физические процессы, происходящие внутри резонатора Гельмгольца, и определить в явном виде основные причины затухания звуковых волн, так как наблюдатель эксперимента видит только показания микрофонов в двух точках. Для более детального изучения процесса звукопоглощения в ячейке ЗПК используется прямое численное моделирование, проводимое в коммерческом программном продукте, например, как в работе [6].

Целью данного исследования является определение локальных акустических характеристик ячейки звукопоглощающей конструкции резонансного типа. Для достижения поставленной цели ставятся следующие задачи:

1. Определить экспериментальным методом импеданс и коэффициент поглощения образца ЗПК.
2. Провести трехмерное газодинамическое моделирование звуковых волн в интерферометре в отечественном программном пакете ЛОГОС Аэро-Гидро.
3. Выполнить валидацию расчета по результатам эксперимента при исследовании акустических характеристик одиночного резонатора, включая численную [7].

В качестве объекта исследования взят одиночный резонатор цилиндрической формы, установленный в интерферометр нормального падения. Длина горла и характерный размер полости резонатора должны быть много меньше длины волны, площадь сечения горла должна быть много меньше площади сечения полости. Геометрия одиночного резонатора представлена на рис. 2.

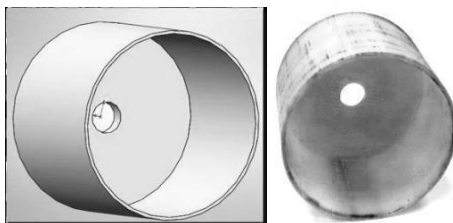


Рис. 2. Резонатор Гельмгольца

В ходе проведения эксперимента динамик возбуждает звуковые колебания с частотами в диапазоне от 500 Гц до 3000 Гц, и записываются значения акустического давления с двух микрофонов, расположенных, как показано на рис. 1. Затем с помощью стандартизированного двух-микрофонного метода передаточной функции определяются, соответственно, коэффициент отражения, импеданс и коэффициент звукопоглощения [2, 5] по формулам:

$$R(f_k) = \frac{H_{21}(f_k) - e^{-i\frac{2\pi f_k}{c}(l_2-l_1)}}{e^{i\frac{2\pi f_k}{c}(l_2-l_1)} - H_{21}(f_k)} e^{2i\frac{2\pi f_k l_2}{c}}$$

$$Z(f_k) = \frac{1 + R(f_k)}{1 - R(f_k)}, k = 0..N - 1$$

$$\alpha = 1 - |R|^2.$$

Здесь H_{21} – передаточная функция, f_k – значение частоты, k – индекс соответствующий частоте, c – скорость звука, l_1, l_2 – расстояния до микрофонов (см. рис. 1).

2. Методика расчета

Многофункциональный программный комплекс ЛОГОС, разработанный в ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", предназначен для численного моделирования процессов, протекающих при рассмотрении аэро- и гидродинамики, тепломассопереноса, статической, динамической и вибрационной прочности и разрушения, электродинамики, а также для проведения сопряженных или связанных мультидисциплинарных расчетов.

Нестационарное течение вязкого сжимаемого теплопроводного газа в ПО ЛОГОС Аэро-Гидро описывается системой уравнений Навье–Стокса, которая в интегральной форме в декартовой системе координат записывается следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint W dV + \iint [\vec{F} - \vec{G}] \cdot \vec{dS} = 0$$

$$W = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{pmatrix}, F_x = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ \rho uH \end{pmatrix},$$

$$F_y = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho vu \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ \rho vH \end{pmatrix}, F_z = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho wu \\ \rho wv \\ \rho w^2 + p \\ \rho wH \end{pmatrix}$$

$$G_x = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{yx} \\ \tau_{zx} \\ q_x + \tau_{xx}u + \tau_{xy}v + \tau_{xz}w \end{pmatrix},$$

$$G_y = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{zy} \\ q_y + \tau_{yx}u + \tau_{yy}v + \tau_{yz}w \end{pmatrix},$$

$$G_z = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zz} \\ q_z + \tau_{zx}u + \tau_{zy}v + \tau_{zz}w \end{pmatrix},$$

где ρ – плотность газа, u, v, w – компоненты вектора скорости, E – полная энергия, τ_{ij} – компоненты тензора вязких напряжений, q_i – компоненты вектора теплового потока, $E = H - \frac{p}{\rho}$ – полная энергия, в которую входит

$$H = h + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2}$$

полная энтальпия; где $h = C_p T$ – энтальпия, p – давление, C_p – теплоемкость при постоянном давлении.

Система уравнений Навье–Стокса замыкается уравнением состояния $\rho = \rho(p, T)$, где T – температура. В расчетах для замыкания задачи использовалось уравнение состояния идеального газа с материальными константами, соответствующими воздуху.

В расчетах использовались два подхода: прямое численное моделирование и модель турбулентности SST. Неструктурированная сетка содержала 4 млн узлов и изображена на рис. 3.

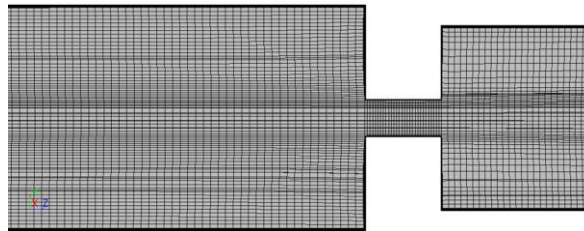


Рис 3. Расчетная сетка

На входе в расчетную область задается сигнал в виде давления, зависящего от времени, изображенный на рис. 4.

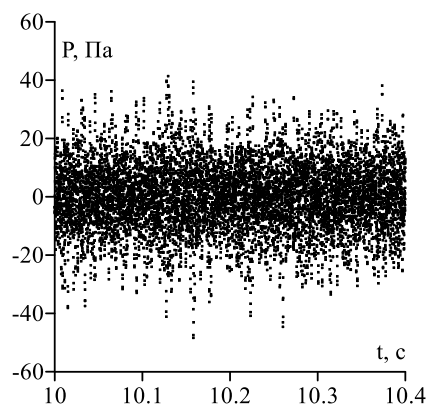


Рис 4. Фрагмент сигнала на входе

Амплитуда сигнала составляла примерно 40 Па, что соответствует реальному экспериментальному значению.

3. Результаты

Полученные результаты численных расчетов сравниваются с экспериментальными данными. На рис. 5 представлена зависимость коэффициента поглощения звукового сигнала α для разных частот.

График коэффициента поглощения показывает, на какой частоте лучше всего работает резонатор. Видно, что обе зависимости имеют характерный максимум, что говорит о том,

что расчет отражает свойства используемого резонатора поглощать звук наиболее эффективно на частоте порядка 700 Гц.

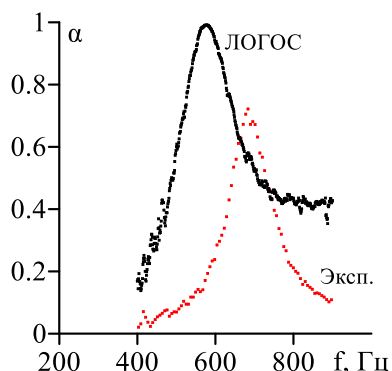


Рис. 5. Зависимость коэффициента поглощения от частоты звука

Экспериментальные и расчетные данные по импедансу изображены на рис. 6 для разных значений частоты. Видно, что максимум данной величины также воспроизводится в ходе численного моделирования.

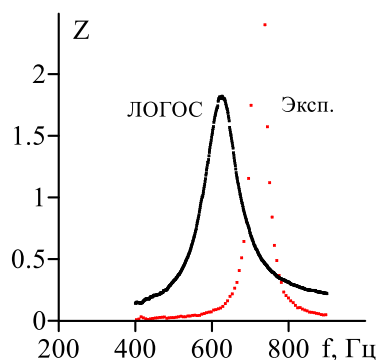


Рис. 6. Зависимость импеданса от частоты звука

При более высоких частотах наблюдается большой разброс результатов численного моделирования и экспериментальных данных как для коэффициента поглощения, так и импеданса. Причину столь высокого разброса на данный момент выявить не удалось. Требуется дальнейшие исследования.

На рис. 7 изображено поле давления в осевом сечении для момента времени $t = 0.4$ сек в ходе численного моделирования. Видно, что с хорошей точностью фронт волны является плоским, т.е. имеет место одномерная продольная звуковая волна.



Рис. 7. Поле давления в импедансной трубе и резонаторе



Рис. 8. Поле температуры в импедансной трубе и резонаторе

Несмотря на наложение условия адиабатичности стенок в ходе расчетов, при прохождении звуковой волны в соответствии с ожиданиями наблюдаются колебания температуры. На рис. 8 изображено поле температуры в осевом сечении при $t = 0.4$ сек. Видно, что температурная бегущая волна полностью повторяет поле давления.

Этот результат хорошо согласуется с простым аналитическим выражением, справедливым для плоских звуковых волн, согласно которому осцилляции давления p' и температуры T' однозначно связаны друг с другом следующим известным соотношением [8]:

$$T' = \frac{\beta T}{\rho C_p} p'.$$

Здесь β – коэффициент теплового расширения, T – абсолютная температура.

По результатам численного моделирования на рис. 9 изображена продольная по оси Z компонента скорости в осевом сечении для момента времени $t = 0.4$ сек.

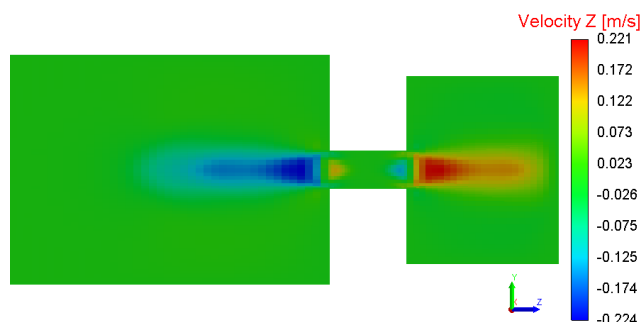


Рис. 9. Компонента скорости по оси Z

Как и ожидалось, максимум по модулю скорости наблюдается в горле резонатора. Видно, что в данный момент времени воздух через отверстие преимущественно поступает в резонатор. Однако не будем забывать, что уравнения гидродинамики рассматриваются применительно к сжимаемой среде. Дивергенция скорости не равна нулю, поэтому вполне естественно, что плотность газа в резонаторе будет меняться периодически вблизи некоторого среднего значения.

4. Заключение

Таким образом, расчеты показывают, что программное обеспечение ЛОГОС Аэро-Гидро неплохо описывает эффект поглощения звука резонатором Гельмгольца, установленным в импедансной трубе, в случае их реалистичных размеров и при наложении практически реализуемых граничных условий. А именно, в ходе численного моделирования воспроизводятся максимумы на графиках коэффициента поглощения звука и импеданса

в зависимости от частоты. Наблюдаемое расхождение между частотами, соответствующими максимумам импеданса и коэффициента звукопоглощения в численном моделировании и натурном эксперименте, вероятно обусловлено двумя основными факторами. Во-первых, в рамках численной модели не удалось точно воспроизвести пространственно-временные характеристики падающей акустической волны, реализованные в экспериментальных условиях. Во-вторых, в расчетах не учитывались термодинамическое взаимодействие между газом и стенками импедансной трубы, в частности – теплообмен, который может существенно влиять на локальные акустические свойства среды и, как следствие, – на резонансное поведение системы.

Список источников

1. Комкин А.И. Методы измерения акустических характеристик звукопоглощающих материалов // Измерительная техника. 2003. № 3. С. 47–50.
2. Chung J. Y., Blaser D. A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory // Journal of acoustical society of America. 1980. Vol. 68, № 3.
3. Dean P. An in-situ method of wall acoustic impedance measurement in flow ducts // Journal of sound and vibration. 1974. Vol. 34, № 1. P. 97–130.
4. Jones M. G., Watson W. R., Nark D. M., Parrot T. L., Gerhold C. H., Brown M. C. Development of experimental and computational aeroacoustic tools for advanced liner evaluation // INTE-NOISE, 2006, 3-6 December, Honolulu, Hawaii, USA.
5. ISO 10534-2, Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method.
6. Колегов Р. Н., Синер А. А., Любимова Т. П., Усанин М. В. Расчет ячейки звукопоглощающей конструкции в установке "Импедансная труба" с помощью коммерческого газодинамического пакета ANSYS FLUENT // Сборник трудов Научной конференции "Сессия Научного совета РАН по акустике и XXVII сессия Российского акустического общества", посвященной памяти ученых-акустиков ФГУП "Крыловский государственный научный центр" А. В. Смольякова и В. И. Попкова, на CD. 2014.
7. Синер А. А., Русаков С. В., Сипатов А. М., Усанин М. В. Об одном подходе к решению обратных задач акустики турбомашин // Ученые записки ЦАГИ. Т. 41, № 1. 2010. С. 53–58.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Курс теоретической физики, Т. 6. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2001.

References

1. Komkin, A. I. (2003), "Metody izmereniya akusticheskikh kharakteristik zvukopogloshchayushchikh materialov" [Methods for measuring acoustic characteristics of sound-absorbing materials], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], no 3, pp. 47–50.
2. Chung, J. Y. and Blaser, D. A. (1980), "Transfer function method of measuring induct acoustic properties. I. Theory", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 68, no 3.
3. Dean, P. (1974), "An in-situ method of wall acoustic impedance measurement in flow ducts", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 34, no 1, pp. 97–130.
4. Jones, M. G., Watson, W. R., Nark, D. M., Parrot, T. L., Gerhold, C. H. and Brown, M. C. (2006), "Development of experimental and computational aeroacoustics tools for advanced liner evaluation", in *INTER-NOISE 2006*, Honolulu, Hawaii, USA, 3–6 December.

5. ISO 10534-2 (1998) *Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method*.
6. Kolegov, R. N., Siner, A. A., Lyubimova, T. P. and Usanin, M. V. (2014), "Расчет ячейки звукопоглощающей конструкции в установке "Импедансная труба" с помощью модуля коммерческого газодинамического пакета ANSYS FLUENT" [Calculation of a sound-absorbing structure cell in an "Impedance tube" setup using the commercial gas dynamics package ANSYS FLUENT], in *Sbornik trudov Nauchnoy konferentsii "Sessiya Nauchnogo soveta RAN po akustike i XXVII sessiya Rossiyskogo akusticheskogo obshchestva"* [Proceedings of the Scientific Conference "Session of the RAS Scientific Council on Acoustics and 27th Session of the Russian Acoustical Society"], dedicated to the memory of acousticians A. V. Smolyakov and V. I. Popkov from Krylov State Research Centre. On CD.
7. Siner, A. A., Rusakov, S. V., Sipatov, A. M. and Usanin, M. V. (2010), "Об одном подходе к решению обратных задач акустики турбомашин" [On one approach to solving inverse problems of turbomachine acoustics], *Uchenye zapiski TsAGI* [TsAGI Science Journal], vol. 41, no. 1, pp. 53–58.
8. Landau, L. D. and Lifshitz, E. M. (2001), *Kurs teoreticheskoy fiziki, T. 6: Gidrodinamika* [Course of theoretical physics, Vol. 6: Hydrodynamics], Fizmatlit, Moscow.

Информация об авторах:

В. Г. Зидыганов – аспирант физико-математического института Пермского государственного национального исследовательского университета (614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15), инженер-конструктор-расчетчик АО "ОДК-Авиадвигатель" (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 93);

А. А. Синер – кандидат физико-математических наук; доцент физико-математического института Пермского государственного национального исследовательского университета (614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15), начальник отдела АО "ОДК-Авиадвигатель" (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 93);

В. А. Демин – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий кафедрой теоретической физики физико-математического института Пермского государственного национального исследовательского университета (614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15).

Information about the authors:

V. G. Zidyganov — Postgraduate Student at the Institute of Physics and Mathematics, Perm State University (15 Bukireva Street, Perm, Russia, 614068), Design and Calculation Engineer at JSC "UEC-Aviadvigatel" (93 Komsomolsky Avenue, Perm, Russia, 614990);

A. A. Siner — Candidate of Physical and Mathematical Sciences; Associate Professor at the Institute of Physics and Mathematics, Perm State University (15 Bukireva Street, Perm, Russia, 614068), Head of Department at JSC "UEC-Aviadvigatel" (93 Komsomolsky Avenue, Perm, Russia, 614990);

V. A. Demin — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor; Head of the Department of Theoretical Physics at the Institute of Physics and Mathematics, Perm State University (15 Bukireva Street, Perm, Russia, 614068).