

Научная статья
УДК 534.833.5

Расчётные исследования настройки резонатора Гельмгольца при малых скоростях потока

Алевтина Сергеевна Коньшина¹, Станислав Иванович Юдин²,
Андрей Олегович Глазков³, Гиви Гурамович Надарейшвили⁴

^{1,2,3,4}ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Москва, Россия

⁴alevtina.konshina@nami.ru

³stanislav.yudin@nami.ru

²andrey.glazkov@nami.ru

¹givi.nadareishvili@nami.ru

Аннотация. Данная работа посвящена расчётным исследованиям настройки резонатора Гельмгольца при малых скоростях потока. Работа проведена с целью установления влияния низкоскоростного потока на частотную настройку резонатора и возможности дальнейшего корректного прогнозирования работы разрабатываемой конструкции глушителя при работе двигателя на холостом ходу и небольших нагрузках.

На данный момент имеется ряд работ, посвящённых настройке собственной частоты резонатора Гельмгольца при наличии высокоскоростного газодинамического потока. Что касается исследований, изучающих влияние малых скоростей потока на настройку собственной частоты акустического фильтра, то информации по данному вопросу нет.

Исследования проводятся с помощью численных расчётов посредством использования метода конечных элементов

Представленная работа направлена на изучение изменения настройки резонансной частоты при наличии малых скоростей потока.

Ключевые слова: система выпуска, резонатор, потери передачи, расчёты методом конечных элементов.

Для цитирования: Коньшина А.С., Юдин С.И., Глазков А.О., Надарейшвили Г.Г. Расчётные исследования настройки резонатора Гельмгольца при малых скоростях потока // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 2 (44).

Original article

Computational studies of the Helmholtz resonator tuning at low flow rates

Alevtina S. Konshina⁴, Stanislav I. Yudin³, Andrey O. Glazkov², Givi G. Nadareishvili¹

^{1,2,3,4}GNC RF FSUE "NAMI", Moscow, Russia

⁴alevtina.konshina@nami.ru

³stanislav.yudin@nami.ru

²andrey.glazkov@nami.ru

¹givi.nadareishvili@nami.ru

Abstract This work is devoted to computational studies of the Helmholtz resonator tuning at low flow rates. The work was carried out in order to establish the effect of low-speed flow on the frequency tuning of the resonator and the possibility of further correct prediction of the operation of the developed muffler design when the engine is idling and low loads.

At the moment, there are a number of works devoted to tuning the natural frequency of the Helmholtz resonator in the presence of a high-speed gas dynamic flow.

This work is aimed at studying changes in the resonance frequency setting in the presence of low flow velocities.

Keywords: exhaust system, resonator, transmission losses, finite element calculations.

For citation: Konshina A.S., Yudin S.I., Glazkov A.O., Nadareishvili G.G.

Computational studies of Helmholtz resonator tuning at low flow rates. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura.* 2025. № 2 (44).

Введение

На сегодняшний день резонатор Гельмгольца активно используется в автомобильном транспорте. Данная конструкция находит применение в таких системах, как впуск, выпуск и кондиционирование [1-4].

Классический резонатор Гельмгольца имеет хорошую акустическую эффективность в достаточно узком диапазоне частот. Оценка его акустической эффективности осуществляется посредством расчёта спектра потерь передач в логарифмическом виде:

$$TL=10\log\left(\frac{W_{in}}{W_{out}}\right), \quad (1)$$

где W_{in} – спектр акустической энергии на входе;

W_{out} – спектр акустической энергии на выходе шумопоглощающего элемента.

Классический вид резонатора Гельмгольца представляет из себя волновод сечением S , к которому через отрезок трубы площадью сечения S_0 и длиной l присоединен объем V (рис. 1).

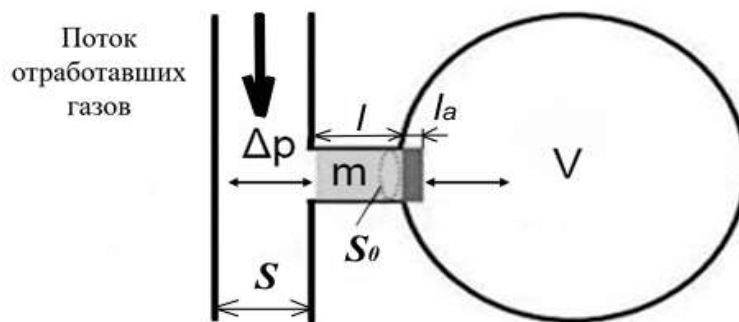


Рис. 1. Классическая схема резонатора Гельмгольца

Классический вид частотной характеристики потери передачи, рассчитанный методом конечных элементов с условием согласованной нагрузки на входе и выходе, приведен на рис. 2.

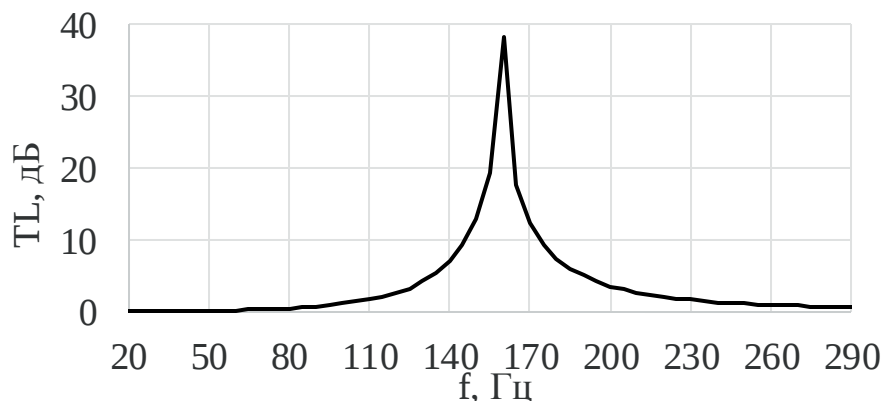


Рис. 2. Резонансный пик с условиями согласованной нагрузки на входе и выходе – симметричный

Граничные условия для выше представленной зависимости задавались аналогично тем, что имеются при реальных условиях эксплуатации данной конструкции.

Расчетные акустические параметры резонатора можно определить из известных формул [5]: резонансная частота f_0 и ширина резонансной кривой Δf .

Собственная частота:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_0}{l_e V}}, \quad (2)$$

где c – скорость звука;

S_0 – площадь горла резонатора;

V – объем полости резонатора;

l_e – эффективная длина горла резонатора, которая может быть представлена в виде суммы действительной l и присоединенной l_a длин горла: $l_e = l + l_a$.

$$\Delta f = \frac{\pi \cdot V}{c \cdot S} f_0^2, \quad (3)$$

В настоящее время имеется большое количество работ, посвященных изучению эффективности гашения звуковых колебаний различными элементами шумоглушения подобного акустического фильтра [6-9]. Отличительной особенностью автомобильных глушителей шума является их работа при наличии высокотемпературного газового потока. Изменение температуры потока приводит к изменению скорости звука и соответствующему изменению частотной настройки, а само наличие потока приводит к образованию турбулентностей, которые влияют как на частотную настройку, так и на амплитуду акустической эффективности [10].

В ходе проделанного исследования был проанализирован ряд статей по данной тематике, в том числе работа [3] зарубежных коллег. В приведённом научном труде представлены результаты конечно-элементного моделирования и экспериментального исследования классического резонатора Гельмгольца, которые показали между собой хорошую

сходимость (рис. 3). С увеличением скорости потока пик кривой потерь передач сдвигается в высокочастотную область. При этом амплитуда рассматриваемого показателя эффективности уменьшается.

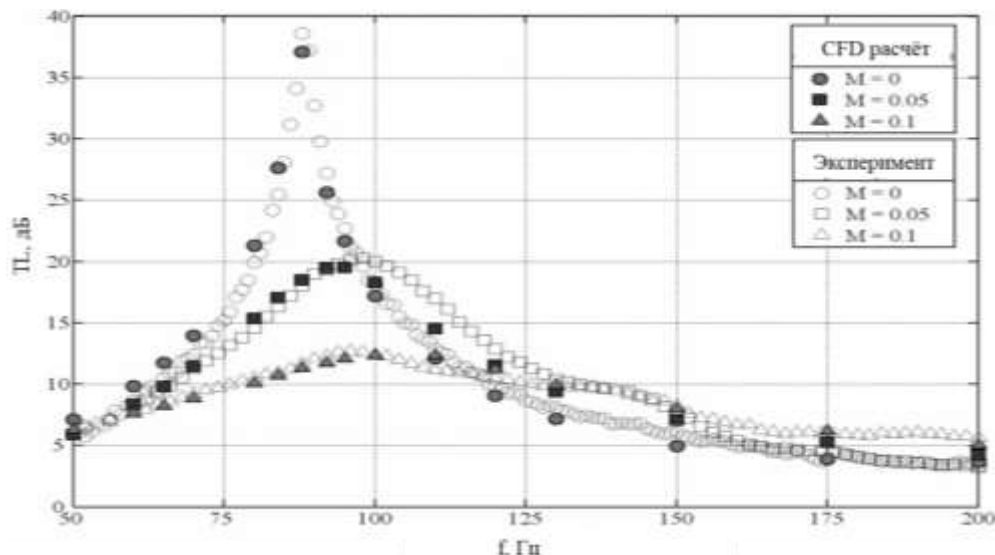


Рис. 3. Сравнение результатов конечно элементного моделирования и эксперимента при числе Маха $M = 0; 0,05$ и $0,1$

Рассмотренные результаты работы стали основой для дальнейших исследований по нашей тематике.

Сравнение результатов расчёта двух вариантов классического резонатора Гельмгольца при малых скоростях потока

В данной работе проведены расчётные исследования различных вариантов резонаторов Гельмгольца (рис. 4), первым из которых является конструкция классического резонатора, упомянутого ранее в работе [3]. Далее этот резонатор обозначен как вариант 1. Помимо этого, рассматривается также модификация классического резонатора с меньшими габаритами и с большей резонансной частотой настройки – вариант 2. Размеры для обоих вариантов приведены в таблице 1.

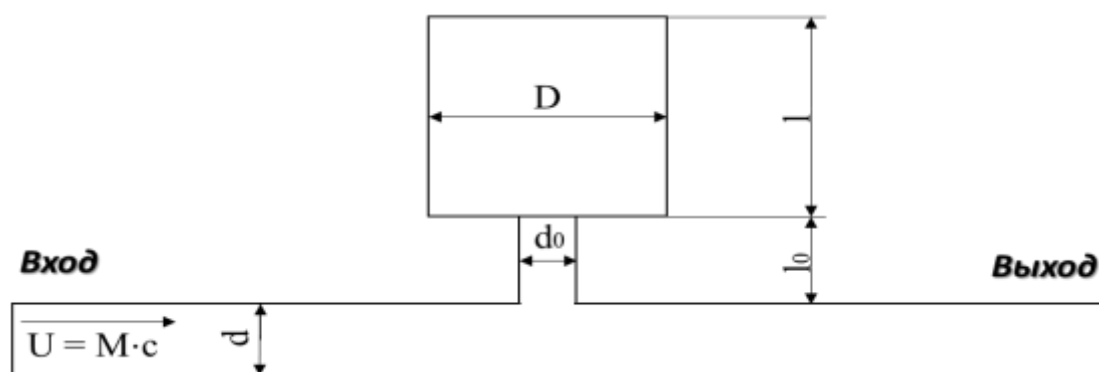


Рис. 4. Схема классического резонатора Гельмгольца: D – диаметр камеры резонатора; d_0 – диаметр горла резонатора; d – диаметр канала; l – длина камеры резонатора; l_0 – длина горла резонатора; U – скорость потока; M – число Маха; c – скорость звука

Таблица 1

Обозначение параметра	Вариант	
	1	2
D	153 мм	50 мм
d_0	40 мм	10 мм
d	49 мм	20 мм
l	244 мм	50 мм
l_0	97 мм	15 мм

В ходе расчёта варианта 1 при M 0,05 и 0,1 была получена хорошая сходимость с результатами статьи [3] – пик сдвигается в высокочастотную область (рис. 5).

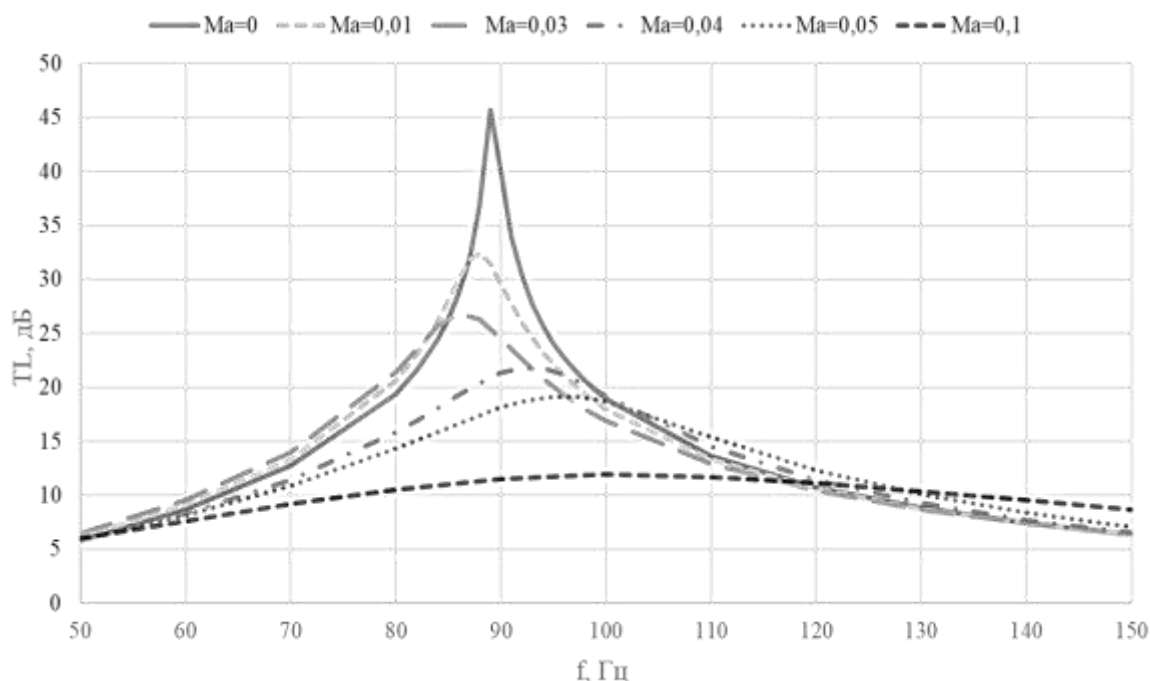


Рис. 5. Результаты расчёта варианта 1

Однако при малых скоростях потока, не рассмотренных в данной статье, резонансный пик сдвигается в низкочастотную область.

Рассмотрим результаты расчёта варианта 2, настройка которого без учёта потока была осуществлена на частоту 346 Гц (рис. 6). Расчёты потерь передачи при наличии газодинамического потока проводились для M равного 0; 0,01; 0,03, 0,05 и 0,1. При больших значениях M (0,05 и 0,1) максимум резонансной кривой потерь передачи также сдвигается в высокочастотную область. Но при малых скоростях потока (0,01 и 0,03), аналогично резонатору вариант 1, резонансный пик сдвигается в низкочастотную область. При этом уменьшение амплитуды резонансных пиков существенно больше, соответственно, увеличивается ширина пиков.

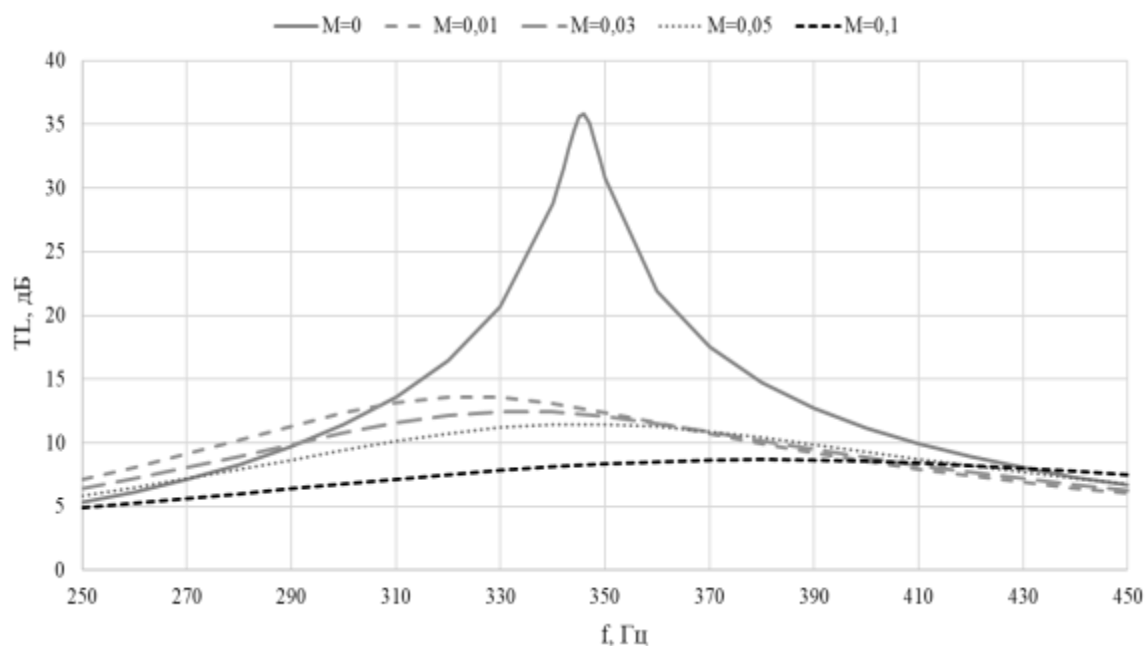


Рис. 6. Результаты расчёта варианта 2

Кольцевой резонатор Гельмгольца при малых скоростях потока

Исследовалась схема резонатора, которая имеет конструкцию применимую в системах выпуска автомобилей. Горло резонатора в данном случае представлено в виде кольца длиной l_0 и площадью сечения S_0 (рис. 7).

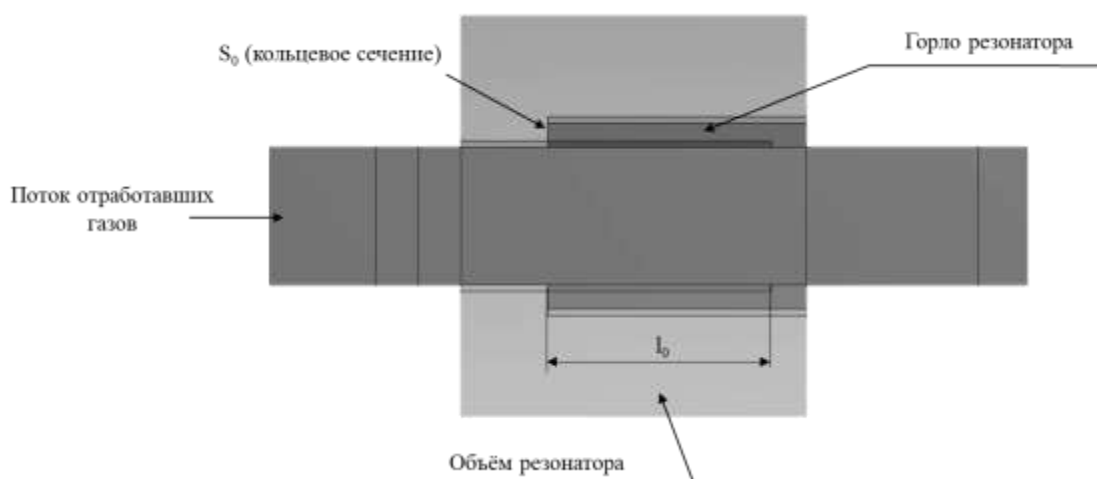


Рис. 7. Кольцевой резонатор Гельмгольца

В данном случае рассматривались варианты с M равным 0; 0,005; 0,01; 0,05 и 0,1. При появлении потока резонансная частота сдвигается в

низкочастотную область с 98 Гц до 94 Гц. В дальнейшем при увеличении скорости резонансная частота начинает сдвигаться в высокочастотную область и на скорости $M 0,1$ сравнивается с исходной резонансной частотой 98 Гц (рис. 8).

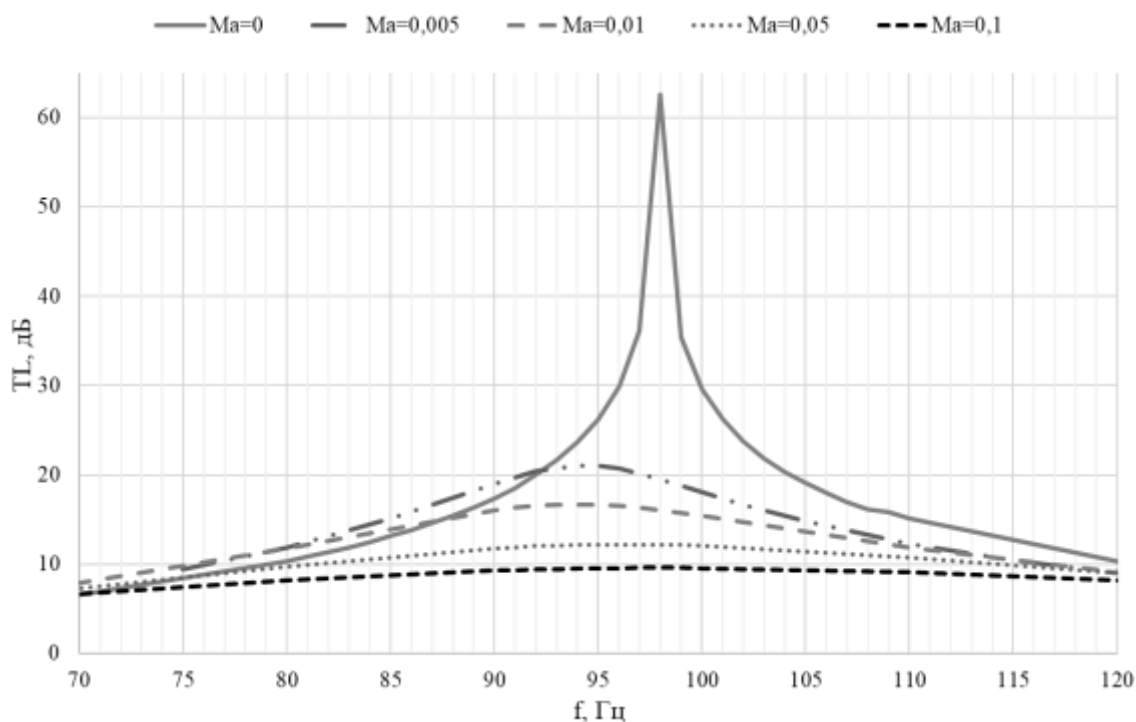


Рис. 8. Результаты расчёта кольцевого резонатора Гельмгольца

Далее представлена зависимость относительного изменения резонансной частоты резонатора в зависимости от скорости потока (рис. 9).

$$\frac{\Delta F}{F_0} = \frac{F_0 - F_m}{F_0}, \quad (4)$$

где F_0 – собственная частота при $M = 0$;

ΔF – разница собственной частоты при отсутствии потока ($M = 0$) и при наличии потока со скоростью M .

Смещение в область высоких частот на низких скоростях происходит для первого варианта более интенсивно на фоне других. После $M = 0,09$ резонансный пик начинает сдвигаться в область высоких частот.

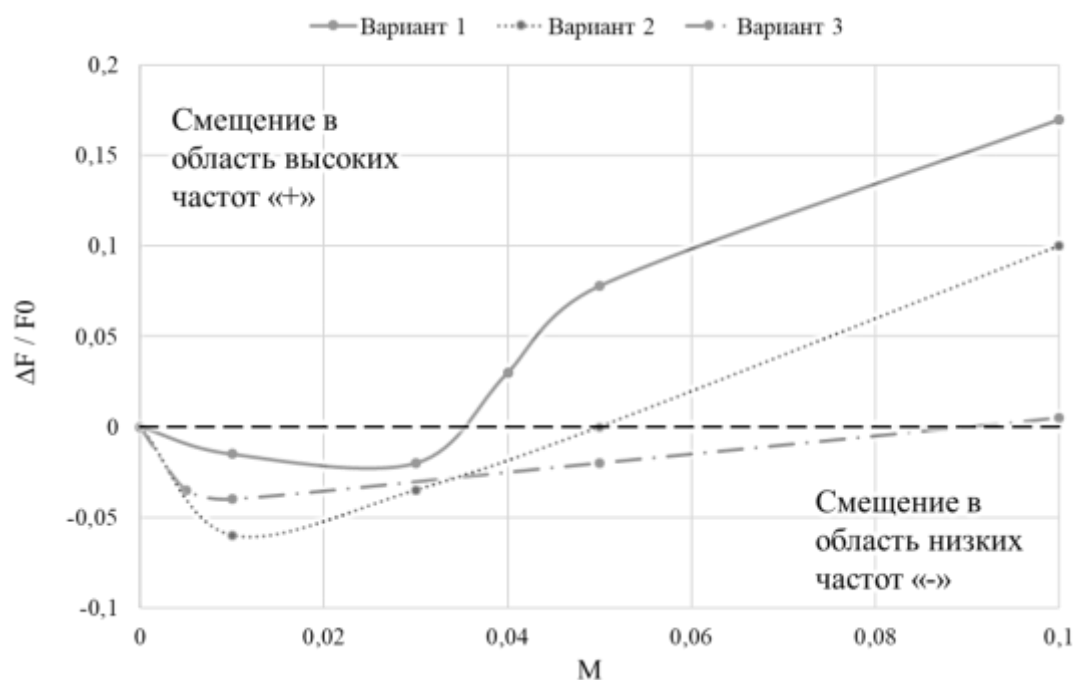


Рис. 9. Относительное изменение ΔF резонансной частоты F_0 в зависимости от скорости потока (число Маха)

Выводы

1. При работе автомобиля на холостом ходу (при малых скоростях потока отработавших газов) собственная частота настройки резонатора смещается в область низких частот.
2. Выявлено влияние двух противоположных явлений на характеристику резонансной частоты. При преобладании турбулентности смещение собственной частоты резонатора происходит в область низких частот. Влияние прислойной конвекции приводит к увеличению резонансной частоты.
3. Необходимо экспериментальное подтверждение полученных результатов расчёта при малых скоростях потока. Планируется проработка и изготовление стенда для соответствующих измерений в ФГУП НАМИ, а также теоретическое обоснование полученных результатов.

Список источников

1. Блохинцев, Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды / Д. И. Блохинцев. – 2-е изд. – Москва : Наука, 1981. – 206 с.
2. Phillips, B. Effects of high-wave amplitude and mean flow on a Helmholtz resonator. / B. Phillips // NASA Technical Memorandum X-1582. –1968. – P. 19.
3. Effect of flow on Helmholtz resonator acoustics: A three-dimensional computational study vs. experiments / E. Selamet, A. Selamet, A. Iqbal, H. Kim // SAE Technical Papers. – 2011. – P. 14. – DOI 10.4271/2011-01-1521.
4. Effect of extended necks on transmission loss performances of Helmholtz resonators in presence of a grazing flow / H. Zhaoa, Z. Lu, Y. Guan, Z. Liu, G. Li, J. Liu, C.Z. Ji //Aerospace Science and Technology. – 2018. – Vol. 77, № 6. – P. 228–234. – DOI:10.1016/j.ast.2018.03.002.
5. Быков, А. И. Исследование акустических характеристик резонаторов Гельмгольца в системах снижения шума : специальность 01.04.06 "Акустика" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Быков Алексей Иванович, 2021. – 156 с. – EDN PWGCEI.
6. Ingard, U. On the theory and design of acoustic resonators / U. Ingard // The Journal of the acoustical society of America. – 1953. – Т. 25, №. 6. – P. 1037-1061.
7. Selamet, A. Theoretical, computational and experimental investigation of Helmholtz resonators: one-dimensional versus multi-dimensional approach / A. Selamet, N.S. Dickey, P.M. Radavich // SAE transactions. – 1994. – № 3. – P. 970-979.
8. Zhao, D. Transmission Loss Analysis of a Parallel-Coupled Helmholtz Resonator Network / D. Zhao // AIAA Journal. – 2012. – Vol. 50 (6). – P. 1339-1346. – DOI10.2514/1.J051453.
9. Расчётные исследования настройки резонатора Гельмгольца, где с целью снижения уровня ма автомобиля волновод и горло резонатора находятся внутри объёма резонатора / А. С. Крылова, С. И. Юдин, А. О. Глазков, Г. Г. Надарейшвили // Труды НАМИ. – 2024. – № 3(298). – С. 11-19. – DOI 10.51187/0135-3152-2024-3-11-19. – EDN CRQZRS.
10. Матасова, О. Ю. Особенности расчета элементов глушителей шума при наличии потока / О. Ю. Матасова, А. И. Комкин, А. И. Быков // Noise Theory and Practice. – 2024. – Т. 10, № 1(36). – С. 18-28. – EDN MQDFKY.

References

1. Blokhintsev D.I. *Akustika neodnorodnoy dvizhushcheysya sredy* (Acoustics of an inhomogeneous moving medium), Moscow, Nauka, 1981, 206 p.
2. Phillips B. *NASA Technical Memorandum X-1582*, 1968, 19 p.
3. Selamet E., Selamet A., Iqbal A., Kim H. *SAE Technical Papers*, 2011, 14 p.

4. Zhao H., Lu Z., Guan Y., Liu Z., Li G., Liu J., Ji C.Z. *Aerospace Science and Technology*, 2018, vol. 77, no. 6, pp. 228–234.
5. Bykov, A. I. Issledovaniye akusticheskikh kharakteristik rezonatorov Gel'mgol'tsa v sistemakh snizheniya shuma (Study of acoustic characteristics of Helmholtz resonators in noise reduction systems), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2021, 156 p.
6. Ingard U. *The Journal of the acoustical society of America*, 1953, vol. 25, no. 6, pp. 1037-1061.
7. Selamet A., Dickey N.S., Radavich P.M. *SAE transactions*, 1994, no. 3, pp. 970-979.
8. Zhao D. *AIAA Journal*, 2012, vol. 50(6), pp. 1339-1346.
- Krylova A.S., Yudin S.I., Glazkov A.O., Nadareishvili G.G. *Trudy NAMI*, 2024, no. 3(298), pp. 11-19.
9. Matasova O.Yu., Komkin A.I., Bykov A.I. *Noise Theory and Practice*, 2024, vol. 10, no. 1(36), pp. 18-28.

Рецензент: М.Г. Шатров, д-р техн. наук, проф., МАДИ

Информация об авторах

Коньшина Алевтина Сергеевна, инженер-исследователь, НАМИ.

Юдин Станислав Иванович, главный специалист, НАМИ.

Глазков Андрей Олегович, ведущий инженер-исследователь, НАМИ.

Надарейшвили Гиви Гурамович, д-р техн. наук, зам. Генерального директора по науке, НАМИ.

Information about the authors

Konshina Alevtina S., Research Engineer, NAMI.

Yudin Stanislav I., Chief Specialist, NAMI.

Glazkov Andrey O., Leading Research Engineer, NAMI.

Nadareishvili Givi G., Doctor of Sciences (Technical), Deputy Director General for Science, NAMI.

Статья поступила в редакцию 24.02.2025; одобрена после рецензирования 04.06.2025; принята к публикации 25.06.2025.

The article was submitted 24.02.2025; approved after reviewing 04.06.2025; accepted for publication 25.06.2025.