

УДК 624.042.7

Влияние скользящего потока на акустические характеристики резонатора Гельмгольца

О.Ю. Матасова, А.И. Комкин, А.И. Быков

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Slip flow influence on acoustic characteristics of the Helmholtz resonator

O.Yu. Matasova, A.I. Komkin, A.I. Bykov

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрена аналитическая модель резонатора Гельмгольца на стенке канала. Приведены зависимости его потерь передачи от геометрических параметров. Разработана конечно-элементная модель резонатора Гельмгольца при наличии скользящего потока в канале, на основе которой получены траектории в горле резонатора. Численные расчеты также позволили определить потери передачи резонатора Гельмгольца как функцию частоты для различных скоростей течения скользящего потока. По полученным кривым потерь передачи определены действительная и мнимая части импеданса резонатора Гельмгольца, выраженные в виде его акустического сопротивления и присоединенной длины горла. Приведены зависимости этих параметров от скорости течения скользящего потока и обратного числа Струхала при различных значениях диаметра и длины горла резонатора Гельмгольца. Полученные результаты позволяют существенно повысить точность расчета эффективности глушителей шума с резонаторами Гельмгольца в системах впуска и выпуска двигателей внутреннего сгорания.

EDN: RQVYHK, <https://elibrary/rqvyhk>**Ключевые слова:** резонатор Гельмгольца, стенка канала, скользящий поток, присоединенная длина горла, потери передачи, акустический импеданс

The paper considers an analytical model of the Helmholtz resonator on the channel wall, and presents its transmission loss dependences on the geometric parameters. A finite element model of the Helmholtz resonator is elaborated with a slip flow in the channel, it formed the basis to obtain flow trajectories in the resonator throat. Numerical computation also makes it possible to determine the Helmholtz resonator transmission loss as a function of frequency for the different slip flow velocities. Based on the obtained transmission loss curves, the real and imaginary parts of the Helmholtz resonator impedance are determined, they are expressed as its acoustic resistance and the attached throat length. The paper presents these parameter dependences on the slip flow velocity and the Strouhal number for different values of the resonator throat diameter and length. The results obtained are making it possible to significantly improve the accuracy in computing efficiency of the noise mufflers with the Helmholtz resonators in the intake and exhaust systems of the internal combustion engines.

EDN: RQVYHK, <https://elibrary/rqvyhk>**Keywords:** Helmholtz resonator, channel wall, slip flow, attached throat length, transmission loss, acoustic impedance

Резонатор Гельмгольца (РГ) — один из самых распространенных типовых элементов глушителей шума. РГ нашел широкое применение в различных выпускных системах энергетических установок, например в двигателях внутреннего сгорания, где присутствует поток газов, оказывающий существенное влияние на акустическую эффективность глушителя шума. Поэтому изучение характеристик РГ на стенке канала при наличии в нем скользящего потока (СП) является актуальным и вызывает неослабевающий интерес исследователей [1–13].

Еще в 40-х годах прошлого века Д.И. Блохинцев [1] с помощью простой математической модели описал некоторые особенности взаимодействия РГ с воздушным СП. Начальный этап исследований в этом направлении состоял главным образом в создании специальных экспериментальных установок, позволяющих измерять акустические характеристики РГ на стенке канала при различных значениях скорости СП и уровня звукового давления.

Обзор применяемых с этой целью методов измерения приведен в статье [2]. Основным являлся метод двух микрофонов, когда один из них устанавливали на стенке канала, а другой — в полости РГ. Таким методом получены наиболее значимые результаты на этом этапе [3–6].

В работе [3] отмечено, что с повышением скорости течения СП происходит существенное увеличение сопротивления РГ, а также возрастание резонансной частоты, но более плавное и стремящееся к некоторому пределу при большой скорости течения СП.

Дж.С. Андерсон [4] использовал в измерительной установке широкополосный шум и, основываясь на спектральном анализе, выявил, что наличие СП существенно влияет на основную резонансную частоту РГ и незначительно — на резонансные частоты большего порядка.

В работе [5] по результатам экспериментов установлено, что РГ демонстрирует линейное увеличение акустического сопротивления и уменьшение реактивного сопротивления с ростом скорости течения СП. Также отмечено, что снижение резонансной частоты РГ при наличии в канале СП можно объяснить, основываясь на механической модели РГ. В такой модели воздух в объеме РГ определяется ее упругостью, а колеблющаяся масса — массой воздуха в горле РГ и так называемой присоединенной массой с обеих сторон горла, описываемой в терминах присоединенной длины. СП

как бы сдвигает присоединенную массу с одной стороны горла РГ, тем самым увеличивая его резонансную частоту. Если принять, что присоединенные массы с обеих сторон горла примерно одинаковые, то наличие СП может привести к двукратному снижению присоединенной длины горла РГ.

Однако, как показали результаты измерений [5], присоединенная длина горла РГ при высокой скорости течения СП уменьшается гораздо больше, практически сводясь к нулю. Отсюда следует, что предложенную физическую интерпретацию полученных результатов нельзя взять за основу, и что взаимодействие звуковой волны со СП имеет более сложный характер.

Этот вывод подтвержден результатами работы [6], где проведена визуализация СП в подкрашенной жидкой среде. Установлено, что характеры протекания СП различаются во время циклов притока и оттока. Когда СП входит в отверстие, эффективная площадь отверстия значительно уменьшается, вследствие чего потери энергии в цикле притока СП больше, чем в цикле его оттока.

Сложность происходящих при этом процессов делает аналитические методы непригодными для адекватного моделирования присущей им физики, хотя некоторые попытки построения такого рода аналитических моделей и предпринимались [5, 7]. Это приводит к необходимости использования численных расчетов на базе метода конечных элементов.

На основе такого подхода начался новый этап исследования РГ в канале со СП [8, 9]. При этом главным показателем, оценивающим акустическую эффективность РГ, становятся потери передачи TL , определяемые через логарифм отношения звуковой мощности падающей волны в канале перед РГ к мощности прошедшей звуковой волны в канале за РГ.

В работе [9] потери передачи TL в рассмотренной системе определены как на основе численных расчетов методом конечных элементов, так и экспериментально. Получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. Использование такого показателя, как потери передачи TL , позволило получить более достоверные оценки для действительной и мнимой частей импеданса РГ и установить, что зависимость этих параметров от скорости СП носит нелинейный характер.

По результатам численных расчетов [10] выявлено, что в поле течения вокруг отверстия

доминирует вихревая составляющая, и на характер течения влияет отношение скорости течения потока через отверстие к скорости течения СП. При этом имеет место возможность нелинейного взаимодействия СП и акустических волн.

В публикациях [11–13] рассмотрены различные конфигурации РГ на стенке канала и зависимости их потерь передачи TL от скорости течения СП.

Цель работы — получить на основе численных расчетов зависимости акустических характеристик РГ — сопротивления и присоединенной длины горла — от скорости течения СП в канале при варьировании геометрических параметров в системе РГ — канал.

Аналитическая модель РГ в канале. Рассмотрим РГ, размещенный на боковой стенке канала, где распространяется звуковая волна, а также постоянный воздушный поток, скорость течения которого характеризуется числом Маха M (рис. 1). Будем исследовать простейшую модель РГ, где жесткая замкнутая полость, характеризующаяся объемом V , соединена с каналом через горло с площадью поперечного сечения S_0 и длиной l . Полагаем, что размеры РГ много меньше рассматриваемых длин волн. Будем считать канал поперечного сечения S таким узким, что в нем могут распространяться только плоские звуковые волны.

К основным акустическим характеристикам такой системы относятся потери передачи [14]

$$TL = 20 \lg |1 + 1/(2S'Z')|. \quad (1)$$

Здесь S' — относительная площадь поперечного сечения канала, $S' = S/S_0$; Z' — безразмерный акустический импеданс РГ,

$$Z' = \frac{Z}{\rho_0 c_0},$$

где Z — акустический импеданс РГ; ρ_0 и c_0 — плотность воздушной среды и скорость звука в ней.

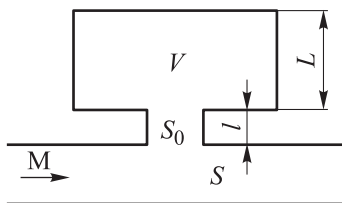


Рис. 1. Расчетная схема РГ в канале

Входящий в состав формулы (1) безразмерный акустический импеданс РГ является комплексной величиной [15] и определяется выражением

$$Z' = R' + i \left(\frac{\omega l_e}{c_0} + \frac{S_0 c_0}{\omega V} \right), \quad (2)$$

где R' — безразмерное сопротивление РГ, $R' = R/(\rho_0 c_0)$; ω — угловая частота РГ, рад/с; l_e — эквивалентная длина горла РГ, определяемая через его действительную длину l и присоединенную длину l_a , $l_e = l - l_a$.

Полагаем, что горло РГ и канал имеют круглые поперечные сечения с диаметром d_0 и d соответственно. Присоединенная длина горла l_a характеризует наличие в его окрестности быстро затухающих высших мод колебаний и пропорциональна диаметру горла РГ d_0 . Поэтому целесообразно ввести в рассмотрение безразмерную присоединенную длину $l' = l_a/d_0$. Как показано в работе [16], для РГ на стенке канала величина l' связана линейной зависимостью с параметром $g = d_0/d$, уменьшающаяся с увеличением g .

Собственная частота РГ ω_0 определяется условием $\text{Im}(Z') = 0$. При расчетах целесообразно перейти от угловой частоты ω_0 к циклической f_0 , которая согласно выражению (2) имеет вид

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_0}{l_0 V}}, \quad \text{Гц}. \quad (3)$$

Для РГ с объемом определенной формы можно уточнить формулу (3) для собственной частоты РГ. Для объема РГ цилиндрической формы длиной L формула (3) приобретает вид [17]

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_0}{l_0 V + L^2 S_0/3}}. \quad (4)$$

На собственной частоте РГ его потери передачи являются максимальными и согласно выражениям (1) и (2) определяются как

$$TL_0 = 20 \lg |1 + 1/(2S'R')|. \quad (5)$$

Потери TL_0 зависят только от отношения площадей поперечных сечений канала и горла РГ S' и безразмерного сопротивления РГ R' и увеличиваются с уменьшением этих параметров. При отсутствии СП в канале сопротивление R' определяется главным образом вязкими потерями в горле РГ.

Заметим, что формулы (3)–(5) можно использовать для расчета безразмерных присоединенной длины горла l' и сопротивления резонатора R' , если значения резонансной частоты f_0 и потери передачи на резонансе TL_0 получены на основе численных расчетов или экспериментально.

Как уже отмечалось, наличие в канале воздушного СП приводит, с одной стороны, к уменьшению присоединенной длины горла РГ, а с другой — к увеличению его сопротивления. Оценить эти изменения теоретически трудно, вследствие чего целесообразно использовать численные расчеты.

Численные расчеты. Конечно-элементное моделирование глушителей шума в частности РГ, имеет отличительные особенности, одной из которых является то, что, на достоверность получаемых результатов может влиять, каким образом осуществляется моделирование СП при подобных численных расчетах. Моделирование РГ с СП является мультифизической задачей, при решении которой сначала рассчитывают параметры СП с помощью уравнений вычислительной гидрогазодинамики, а затем накладывают акустические волны на СП с определенными параметрами, используя линеаризованные уравнения Навье — Стокса.

Течение потока рассматривали как турбулентное, связанное с наличием сложной трехмерной структуры завихренности вещества. Моделирование потока проводили на основе так называемого метода RANS (усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье — Стокса). При моделировании распространения звука в канале с РГ рассматривали плоскую звуковую волну, распространяющуюся вдоль оси канала. Для выполнения условия сочетания профиля плоской звуковой волны и профиля скорости течения несжимаемого СП ограничивали число Маха не более 0,15.

Численные расчеты РГ на стенке канала при наличии газового СП выполняли в программной среде COMSOL Multiphysics, особенности которой детально описаны в работе [18]. Расчетную модель разбивали на конечные элементы в трехмерной системе координат с рассечением модели по продольной плоскости симметрии, использованной для уменьшения вычислительной нагрузки (рис. 2). Максимальный размер конечных элементов не превышал 1,2 мм.

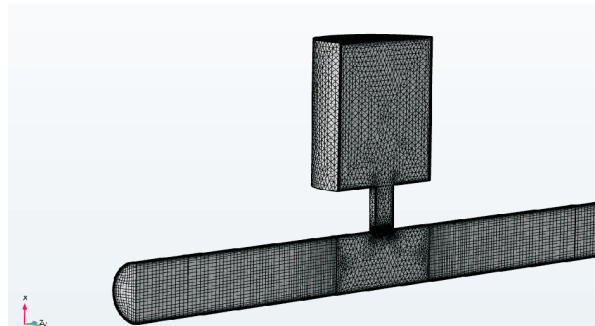


Рис. 2. Конечно-элементная модель РГ на стенке канала

На начальном этапе для проверки достоверности получаемых результатов численного расчета вычисляли потери передачи РГ на стенке канала с размерами, использованными в работе [9]. Это позволило сравнить полученные результаты численных расчетов с данными измерений, приведенными в работе [9]. Такое сравнение показало, что при отсутствии СП ($M = 0$) результаты расчета и эксперимента хорошо согласованы. Расчет со СП ($M = 0,05$) выявил хорошее совпадение по потерям передачи на собственной частоте TL_0 , однако само значение этой частоты при расчете имеет несколько завышенное значение. В целом можно заключить, что используемая конечно-элементная модель приводит к получению достоверных результатов.

Далее последовательно рассматривали различные конфигурации системы РГ — канал, в которых относительно базового варианта последовательно варьировали длину и диаметр горла РГ, а также диаметр канала.

Базовый вариант рассматриваемой системы имел следующие геометрические параметры: диаметр камеры РГ $D = 50$ мм; длина камеры РГ $L = 50$ мм; диаметр горла РГ $d_0 = 10$ мм; длина горла РГ $l = 15$ мм; диаметр канала $d = 20$ мм. Длина канала оставалась неизменной и равнялась 250 мм. РГ размещали на середине канала, с одной стороны которого генерировали гармоническую звуковую волну и воздушный СП, а с другой — располагали безэховую нагрузку.

Для базовой модели вычислены потери передачи TL РГ в канале, графические зависимости которых от частоты РГ f при различных значениях скорости СП U , выраженных через число Маха $M = U/c$, приведены на рис. 3.

При отсутствии СП ($M = 0$) резонансная частота f_0 системы РГ — канал по результатам численных расчетов оказалась равной 324 Гц.

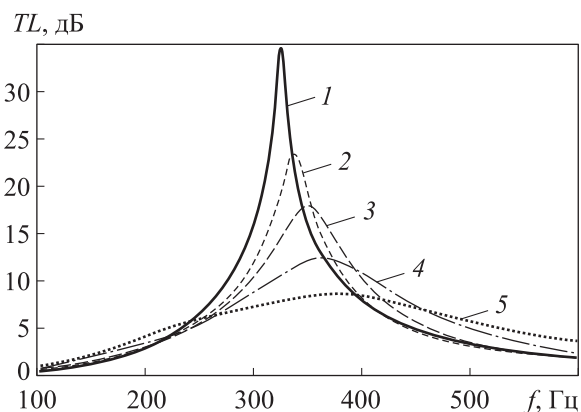


Рис. 3. Зависимости потерь передачи TL РГ в канале от частоты f при числе Маха $M = 0$ (1), 0,04 (2), 0,05 (3), 0,07 (4) и 0,10 (5)

Для базовых параметров вычислить собственную частоту этой системы можно и аналитически с помощью формулы (4). При этом для оценки присоединенной длины горла РГ использовали данные из работ [16, 19].

Аналитические расчеты показали несколько большую резонансную частоту ($f_0 = 328$ Гц), поскольку формула (4) также является приближенной и дает несколько завышенные значения f_0 . При небольших скоростях СП (до $M = 0,3$) его влияние несущественно. С увеличением скорости СП положение максимума TL сдвигается вправо, и уменьшается его амплитуда. Однако такая закономерность наблюдается до числа Маха $M = 0,1$. При больших скоростях СП значение резонансной частоты трудно идентифицировать, так как резонансный пик становится очень размытым. Этот результат согласуется с данными работы [9], где, как уже отмечалось, также наблюдалось такое явление при числе Маха $M \approx 0,1$.

Анализ приведенных графиков показал, что СП оказывает заметное влияние на потери передачи РГ лишь в небольшом диапазоне изменения его скорости: СП с числом Маха $M < 0,04$ вызывает незначительные изменения собственной частоты РГ, а при $M > 0,1$ РГ вырождается, фактически теряя резонансные свойства.

Результаты численных расчетов и обсуждение.

На основе численных расчетов исследовано влияние геометрических параметров системы РГ — канал на акустические характеристики РГ. По результатам расчетов для каждой рассмотренной конфигурации РГ построены графические зависимости безразмерных сопротивлений РГ R' и присоединенной длины горла РГ l' от скорости течения СП, определяемой числом Маха M .

Зависимости безразмерных сопротивления РГ R' и присоединенной длины горла РГ l' от числа Маха M при различных значениях длины горла РГ l приведены на рис. 4. Здесь и на последующих рисунках выделенные красным цветом кривые соответствуют конфигурации базовой модели системы РГ — канал.

Как видно из рис. 4, а, при отсутствии СП ($M = 0$) безразмерное сопротивление резонатора R' мало, с появлением СП и увеличением скорости его течения параметр R' возрастает. При малых скоростях течения СП ($M < 0,04$) это возрастание имеет линейный характер, а при больших — нелинейный. Но в любом случае большей длине горла соответствует большее сопротивление РГ.

Согласно рис. 4, б, при числе Маха $M = 0$ наибольшая безразмерная присоединенная длина РГ l' соответствует наибольшей длине

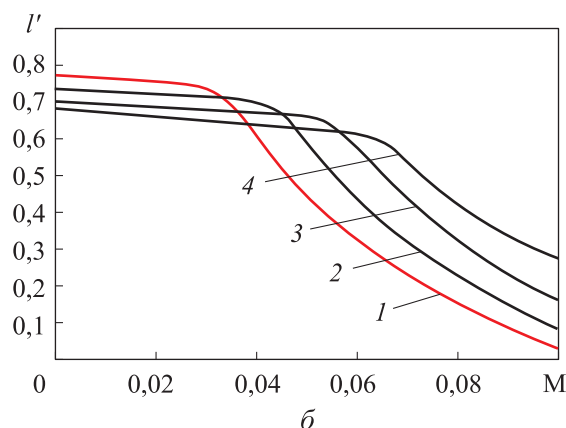
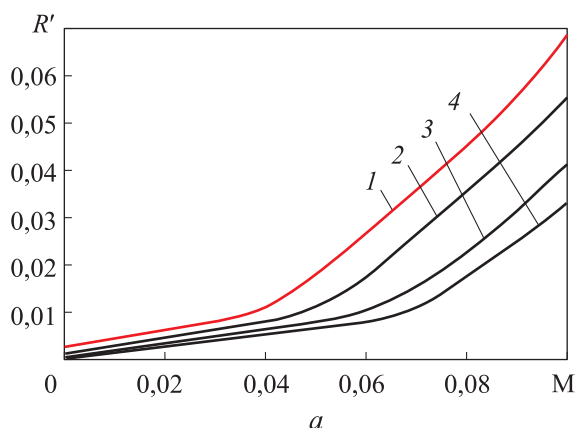


Рис. 4. Зависимости безразмерного сопротивления R' (а) и присоединенной длины горла l' (б) от числа Маха M при длине горла РГ $l = 15$ (1), 10 (2), 5 (3) и 2 мм (4)

горла РГ, что согласовано с теоретическими данными [16]. С увеличением скорости течения СП параметр l' уменьшается. При низких скоростях течения СП это уменьшение имеет линейный характер и является незначительным, как и изменения резонансной частоты рассматриваемой системы. При более высоких скоростях течения СП начинается резкий нелинейный спад безразмерной присоединенной длины РГ l' .

Характерной особенностью приведенных графиков является то, что граничное значение числа Маха M_g , при котором происходит переход от линейного характера изменения величин R' и l' к нелинейному зависит от длины горла РГ: большей длине горла РГ соответствует меньшее значение M_g .

Таким образом, можно заключить, что с увеличением длины горла РГ влияние скорости СП на импеданс РГ возрастает. Это приводит к тому, что если при малых числах Маха большей длине горла РГ соответствует большее значение присоединенной длины l' , то при больших значениях M — меньшее значение l' . Заметим, что при больших скоростях течения СП присоединенная длина горла РГ стремится к нулю. Это означает, что исчезает не только внешняя присоединенная длина горла РГ со стороны действия СП, но и внутренняя со стороны полости, где СП напрямую не действует.

Интерпретацию графических зависимостей на рис. 4 можно получить, основываясь на рассмотрении стационарной картины движения воздушного СП в горле РГ, которое ранее проведено в других работах, например [8, 20, 21] и показало, что движение СП в горле РГ имеет сложный вихреобразный характер.

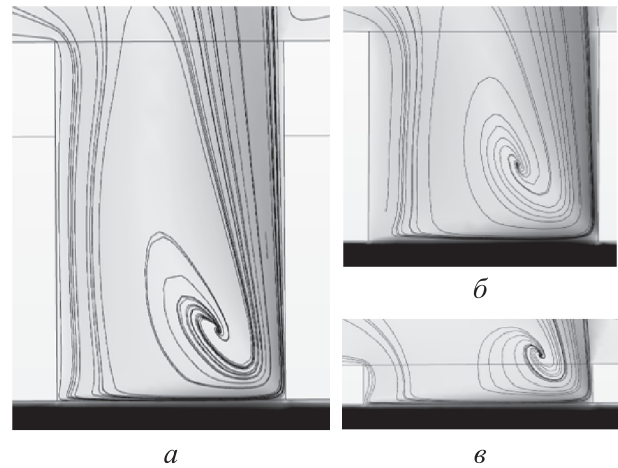


Рис. 5. Картины стационарного СП с числом Маха $M = 0,05$ в горле РГ длиной $l = 15$ (а), 10 (б) и 2 мм (в)

Картины стационарного СП с числом Маха $M = 0,05$ в горле РГ длиной $l = 15, 10$ и 2 мм приведены на рис. 5. Видно, что размер вихря потока воздуха, образующегося на задней стенке горла РГ, зависит от длины горла l . С уменьшением l относительный размер вихря снижается, причем больше пространства в горле РГ остается не задействованным вихрем. Следовательно, с уменьшением длины горла возрастает его эффективное сечение для звуковой волны, что приводит к снижению сопротивления горла и увеличению его присоединенной длины.

Безразмерные величины R' и l' также были рассмотрены как функции от обратного числа Струхала $S^{-1} = U/(\omega_0 d_0)$ (рис. 6, а и б), которое, как и число Маха, пропорционально скорости СП U . При малых значениях U графики для безразмерного сопротивления РГ практически сливаются в одну линию. На больших скоростях течения СП этого не происходит. Соответ-

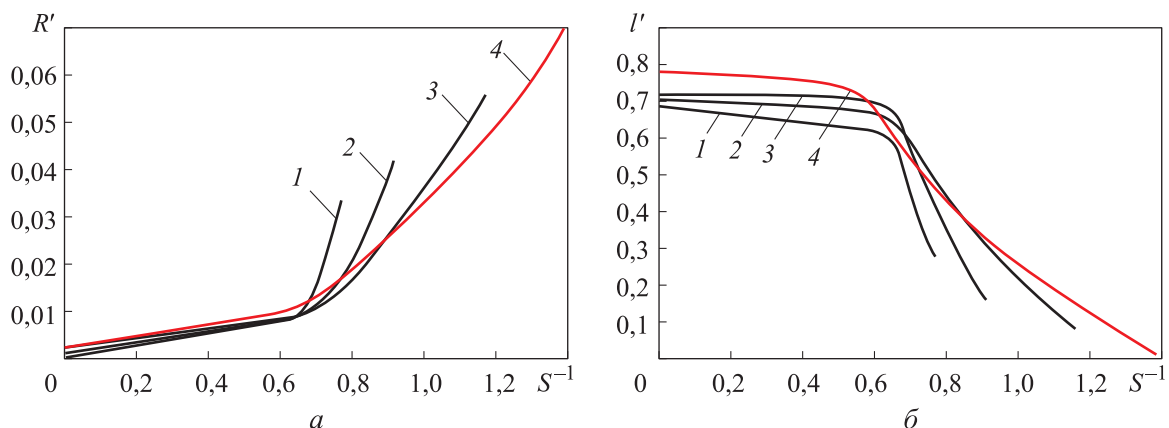


Рис. 6. Зависимости безразмерных сопротивления R' (а) и присоединенной длины l' (б) от обратного числа Струхала S^{-1} при длине горла РГ $l = 2$ (1), 5 (2), 10 (3) и 15 мм (4)

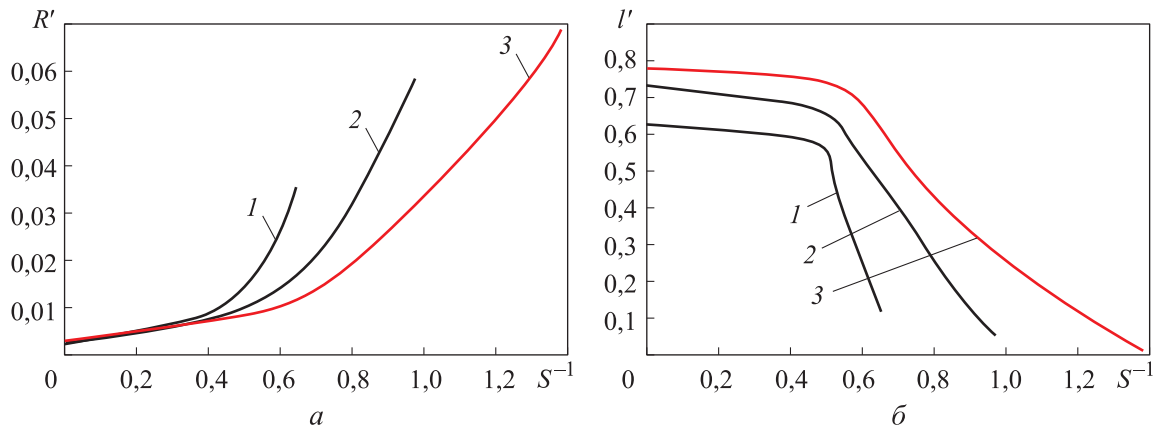


Рис. 7. Зависимости безразмерного сопротивления R' (а) и присоединенной длины l' (б) от обратного числа Струхала S^{-1} при диаметре горла РГ $d_0 = 15$ (1) 12 (2) и 10 мм (3)

ствующие кривые становятся более крутыми: чем меньше длина горла РГ, тем более крутой становится соответствующая кривая. Переход от линейного характера протекания кривых к нелинейному независимо от длины горла РГ происходит при обратном числе Струхала $S^{-1} \approx 0,6$. Аналогичные трансформации при переходе к параметру S^{-1} происходят с графиками для присоединенной длины l' с той лишь разницей, что в области малых значений S^{-1} кривые не сливаются в одну линию вследствие существенной разницы в исходных значениях l' при отсутствии СП.

Также рассмотрены конфигурации РГ, в которых относительно базовой модели менялся диаметр горла РГ. Зависимости акустических характеристик РГ от обратного числа Струхала S^{-1} приведены на рис. 7.

Кривые для безразмерного сопротивления РГ R' при небольших значениях обратного числа Струхала S^{-1} (малых скоростях течения СП) сливаются в одну линию (рис. 7, а). При больших значениях S^{-1} такого слияния не происходит, а кривые становятся более крутыми: чем больше диаметр горла РГ d_0 , тем более крутой становится соответствующая кривая.

Аналогичные закономерности наблюдаются и на графиках для присоединенной длины горла РГ l' (рис. 7, б), с той лишь разницей, что при небольших значениях обратного числа Струхала S^{-1} кривые не сливаются в одну линию. Это обусловлено тем [15, 16], что при отсутствии СП или при малой скорости течения СП происходит заметное уменьшение присоединенной длины горла РГ l' с увеличением диаметра горла. Вместе с тем переход от линейного характера протекания кривых к нелинейному осу-

ществляется при меньших значениях S^{-1} , чем это имело место при варьировании длины горла РГ. В этом случае такой переход осуществляется при $S^{-1} \approx 0,5$.

Обобщая полученные результаты, отметим, что применение обратного числа Струхала S^{-1} для описания влияния скорости течения СП в канале на акустические характеристики РГ является целесообразным, так как позволяет однозначно определять границу перехода линейного характера исследуемых зависимостей к нелинейному. Вместе с тем следует отметить, что использование обратного числа Струхала S^{-1} по-прежнему не позволяет свести в нелинейном режиме все кривые, получаемые при варьировании одного из геометрических параметров РГ, к одной кривой.

Такой результат может быть обусловлен тем, что в качестве скорости течения СП при определении числа Струхала использована осевая скорость течения СП в канале U . Возможно, если бы в качестве таковой скорости выступала связанная с толщиной пограничного слоя в канале конвективная скорость течения СП, как предложено в работах [22, 23], сходимость результатов была бы лучше. Изучение этого вопроса может стать предметом дальнейших исследований.

Выводы

1. Получены зависимости акустических характеристик РГ — сопротивления и присоединенной длины горла — от скорости течения СП в канале для разных конфигураций системы РГ — канал. Установлено, что с увеличением скорости течения СП сопротивление РГ

растет, а присоединенная длина его горла уменьшается.

2. Полученные графические зависимости можно разделить на две области. В области малых скоростей течения СП имеет место линейная, но слабо выраженная зависимость сопротивления РГ и присоединенной длины его горла от скорости течения СП. В области больших скоростей течения СП такая зависимость становится значительной и приобретает нелинейный характер.

3. Скорость течения СП, определяющая точку перехода из линейной области в нелинейную, в некоторой степени зависит от геометри-

ческих параметров системы РГ — канал, но в среднем составляет 0,04 М. Чем меньше длина горла РГ и чем больше его диаметр, тем при большей скорости течения СП начинает оказывать существенное влияние на импеданс РГ, и в целом это влияние оказывается меньшим.

4. При построении графических зависимостей сопротивления РГ и присоединенной длины его горла от обратного числа Струхала переход от линейного характера к нелинейному осуществляется при определенном обратном числе Струхала, равном 0,6 при варьировании длины горла РГ и 0,5 при изменении диаметра горла РГ.

Литература

- [1] Блохинцев Д.И. *Акустика неоднородной движущейся среды*. Москва, Гостехиздат, 1946. 220 с.
- [2] Dean P.D. An in situ method of wall acoustic impedance measurement in flow ducts. *J. Sound Vib.*, 1974, vol. 34, no. 1, pp. 97–130, doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(74\)80357-3](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(74)80357-3)
- [3] Phillips B. *Effects of high-wave amplitude and mean flow on a Helmholtz resonator*. NASA TM X-1582. NASA, 1968. 19 p.
- [4] Anderson J.S. The effect of an air flow on a single side branch Helmholtz resonator in a circular duct. *J. Sound Vib.*, 1977, vol. 52, no. 3, pp. 423–431, doi: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(77\)90569-7](https://doi.org/10.1016/0022-460X(77)90569-7)
- [5] Hersh A.S., Walker B., Bucka M. Effect of grazing flow on the acoustic impedance of Helmholtz resonators consisting of single and clustered orifices. *AIAA paper*, 1978, paper 1124, doi: <https://doi.org/10.2514/6.1978-1124>
- [6] Baumeister K.J., Rice E.J. *Visual study of the effect of grazing flow on the oscillatory flow in a resonator orifice*. NASA TM X-3288. NASA, 1975. 27 p.
- [7] Walker B.E., Charwat A.F. Correlation of the effects of grazing flow on the impedance of Helmholtz resonators. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1982, vol. 72, no. 2, pp. 550–555, doi: <https://doi.org/10.1121/1.388035>
- [8] Iqbal A., Selamet A. A two-dimensional computational study of the flow effect on the acoustic behaviour of Helmholtz resonators. *Int. J. Veh. Noise Vib.*, 2010, vol. 6, no. 2–4, pp. 130–148, doi: <https://doi.org/10.1504/IJNV.2010.036682>
- [9] Selamet E., Selamet A., Iqbal A. et al. Effect of flow on Helmholtz resonator acoustics: a three-dimensional computational study vs. experiments. *SAE Tech. Pap.*, 2011, no. 2011-01-1521, doi: <https://doi.org/10.4271/2011-01-1521>
- [10] Dai X., Jing X., Sun X. Discrete vortex model of a Helmholtz resonator subjected to high-intensity sound and grazing flow. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2012, vol. 132, no. 5, pp. 2988–2996, doi: <http://dx.doi.org/10.1121/1.4757736>
- [11] Lu Z., Pan W., Guan Y. Numerical studies of transmission loss performances of asymmetric Helmholtz resonators in the presence of a grazing flow. *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control*, 2019, vol. 38, no. 2, pp. 244–254, doi: <https://doi.org/10.1177/1461348418817914>
- [12] Zhao H., Lu Z., Guan Y. et al. Effect of extended necks on transmission loss performances of Helmholtz resonators in presence of a grazing flow. *Aerosp. Sci. Technol.*, 2018, vol. 77, no. 6, pp. 228–234, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.03.002>
- [13] Wu W., Guan Y. Numerical optimizing noise damping performances of Helmholtz resonators with a rigid baffle implemented at neck in presence of a grazing flow. *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control*, 2022, vol. 41, no. 4, pp. 1386–1401, doi: <https://doi.org/10.1177/14613484221096232>

- [14] Bykov A., Komkin A. Design of Helmholtz resonator with required characteristics. *MATEC Web Conf.*, 2020, vol. 320, art. 00012, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032000012>
- [15] Комкин А.И., Миронов М.А., Быков А.И. Поглощение звука резонатором Гельмгольца. *Акустический журнал*, 2017, т. 63, № 4, с. 356–363, doi: <https://doi.org/10.7868/S0320791917030078>
- [16] Комкин А.И., Быков А.И. Инерционная присоединенная длина горла резонаторов Гельмгольца. *Акустический журнал*, 2016, т. 62, № 3, с. 277–287, doi: <https://doi.org/10.7868/S0320791916030096>
- [17] Panton R.L., Miller J.M. Resonant frequencies of cylindrical Helmholtz resonators. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1975, vol. 57, no. 6-2, pp. 1533–1535, doi: <https://doi.org/10.1121/1.380596>
- [18] Matasova O.Yu., Komkin A.I., Tupov V.B. *Features of mufflers simulation in the presence of a grazing flow*. The 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) conference, 2024. 5 p., doi: <https://doi.org/10.1109/REEPE60449.2024.10479857>
- [19] Комкин А.И., Миронов М.А., Юдин С.И. Собственная частота резонатора Гельмгольца на стенке прямоугольного канала. *Акустический журнал*, 2014, т. 60, № 2, с. 145–151, doi: <https://doi.org/10.7868/S0320791914020105>
- [20] Дубень А.П., Козубская Т.К., Королев С.И. и др. Исследование акустического течения в горле резонатора. *Акустический журнал*, 2012, т. 58, № 1, с. 80–92.
- [21] Zhang X., Cheng L. Acoustic impedance of micro-perforated panels in a grazing flow. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2019, vol. 145, no. 4, pp. 2461–2469, doi: <https://doi.org/10.1121/1.5098785>
- [22] Kooijman G., Hirschberg A., Golliard J. Acoustical response of orifices under grazing flow: effect of boundary layer profile and edge geometry. *J. Sound Vib.*, 2008, vol. 315, no. 4-5, pp. 849–874, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.02.030>
- [23] Chen Z., Ji Z., Huang H. Acoustic impedance of perforated plates in the presence of fully developed grazing flow. *J. Sound Vib.*, 2020, vol. 485, art. 115547, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115547>

References

- [1] Blokhintsev D.I. *Akustika neodnorodnoy dvizhushcheyasya sredy* [Acoustics of inhomogeneous moving medium]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1946. 220 p. (In Russ.).
- [2] Dean P.D. An in situ method of wall acoustic impedance measurement in flow ducts. *J. Sound Vib.*, 1974, vol. 34, no. 1, pp. 97–130, doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(74\)80357-3](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(74)80357-3)
- [3] Phillips B. *Effects of high-wave amplitude and mean flow on a Helmholtz resonator*. NASA TM X-1582. NASA, 1968. 19 p.
- [4] Anderson J.S. The effect of an air flow on a single side branch Helmholtz resonator in a circular duct. *J. Sound Vib.*, 1977, vol. 52, no. 3, pp. 423–431, doi: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(77\)90569-7](https://doi.org/10.1016/0022-460X(77)90569-7)
- [5] Hersh A.S., Walker B., Bucka M. Effect of grazing flow on the acoustic impedance of Helmholtz resonators consisting of single and clustered orifices. *AIAA paper*, 1978, paper 1124, doi: <https://doi.org/10.2514/6.1978-1124>
- [6] Baumeister K.J., Rice E.J. *Visual study of the effect of grazing flow on the oscillatory flow in a resonator orifice*. NASA TM X-3288. NASA, 1975. 27 p.
- [7] Walker B.E., Charwat A.F. Correlation of the effects of grazing flow on the impedance of Helmholtz resonators. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1982, vol. 72, no. 2, pp. 550–555, doi: <https://doi.org/10.1121/1.388035>
- [8] Iqbal A., Selamet A. A two-dimensional computational study of the flow effect on the acoustic behaviour of Helmholtz resonators. *Int. J. Veh. Noise Vib.*, 2010, vol. 6, no. 2–4, pp. 130–148, doi: <https://doi.org/10.1504/IJNVN.2010.036682>
- [9] Selamet E., Selamet A., Iqbal A. et al. Effect of flow on Helmholtz resonator acoustics: a three-dimensional computational study vs. experiments. *SAE Tech. Pap.*, 2011, no. 2011-01-1521, doi: <https://doi.org/10.4271/2011-01-1521>

- [10] Dai X., Jing X., Sun X. Discrete vortex model of a Helmholtz resonator subjected to high-intensity sound and grazing flow. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2012, vol. 132, no. 5, pp. 2988–2996, doi: <http://dx.doi.org/10.1121/1.4757736>
- [11] Lu Z., Pan W., Guan Y. Numerical studies of transmission loss performances of asymmetric Helmholtz resonators in the presence of a grazing flow. *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control*, 2019, vol. 38, no. 2, pp. 244–254, doi: <https://doi.org/10.1177/1461348418817914>
- [12] Zhao H., Lu Z., Guan Y. et al. Effect of extended necks on transmission loss performances of Helmholtz resonators in presence of a grazing flow. *Aerosp. Sci. Technol.*, 2018, vol. 77, no. 6, pp. 228–234, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.03.002>
- [13] Wu W., Guan Y. Numerical optimizing noise damping performances of Helmholtz resonators with a rigid baffle implemented at neck in presence of a grazing flow. *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control*, 2022, vol. 41, no. 4, pp. 1386–1401, doi: <https://doi.org/10.1177/14613484221096232>
- [14] Bykov A., Komkin A. Design of Helmholtz resonator with required characteristics. *MATEC Web Conf.*, 2020, vol. 320, art. 00012, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032000012>
- [15] Komkin A.I., Mironov M.A., Bykov A.I. Sound absorption by a Helmholtz resonator. *Akusticheskiy zhurnal*, 2017, vol. 63, no. 4, pp. 356–363, doi: <https://doi.org/10.7868/S0320791917030078> (in Russ.). (Eng. version: *Acoust. Phys.*, 2017, vol. 63, no. 4, pp. 385–392, doi: <https://doi.org/10.1134/S1063771017030071>)
- [16] Komkin A.I., Bykov A.I. Inertial attached neck length of Helmholtz resonators. *Akusticheskiy zhurnal*, 2016, vol. 62, no. 3, pp. 277–287, doi: <https://doi.org/10.7868/S0320791916030096> (in Russ.). (Eng. version: *Acoust. Phys.*, 2016, vol. 62, no. 3, pp. 269–279, doi: <https://doi.org/10.1134/S106377101603009X>)
- [17] Panton R.L., Miller J.M. Resonant frequencies of cylindrical Helmholtz resonators. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1975, vol. 57, no. 6–2, pp. 1533–1535, doi: <https://doi.org/10.1121/1.380596>
- [18] Matasova O.Yu., Komkin A.I., Tupov V.B. *Features of mufflers simulation in the presence of a grazing flow*. The 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) conference, 2024. 5 p., doi: <https://doi.org/10.1109/REEPE60449.2024.10479857>
- [19] Komkin A.I., Mironov M.A., Yudin S.I. Eigenfrequency of a Helmholtz resonator at the wall of a rectangular duct. *Akusticheskiy zhurnal*, 2014, vol. 60, no. 2, pp. 145–151, doi: <https://doi.org/10.7868/S0320791914020105> (in Russ.). (Eng. version: *Acoust. Phys.*, 2014, vol. 60, no. 2, pp. 142–147 (2014). <https://doi.org/10.1134/S1063771014020109>)
- [20] Duben A.P., Kozubskaya T.K., Korolev S.I. et al. Acoustic flow in the resonator throat: Experiment and computational modeling. *Akusticheskiy zhurnal*, 2012, vol. 58, no. 1, pp. 80–92. (In Russ.). (Eng. version: *Acoust. Phys.*, 2012, vol. 58, no. 1, pp. 69–80, doi: <https://doi.org/10.1134/S106377101201006X>)
- [21] Zhang X., Cheng L. Acoustic impedance of micro-perforated panels in a grazing flow. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2019, vol. 145, no. 4, pp. 2461–2469, doi: <https://doi.org/10.1121/1.5098785>
- [22] Kooijman G., Hirschberg A., Golliard J. Acoustical response of orifices under grazing flow: effect of boundary layer profile and edge geometry. *J. Sound Vib.*, 2008, vol. 315, no. 4–5, pp. 849–874, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.02.030>
- [23] Chen Z., Ji Z., Huang H. Acoustic impedance of perforated plates in the presence of fully developed grazing flow. *J. Sound Vib.*, 2020, vol. 485, art. 115547, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115547>

Статья поступила в редакцию 19.02.2025

Информация об авторах

МАТАСОВА Ольга Юрьевна — ассистент кафедры «Экология и промышленная безопасность». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: matasovaoyu@bmstu.ru).

КОМКИН Александр Иванович — доктор технических наук, профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: aik@mail.ru).

БЫКОВ Алексей Иванович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Экология и промышленная безопасность». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: aleksbykov@mail.ru).

Information about the authors

MATASOVA Olga Yuryevna — Assistant, Department of Ecology and Industrial Safety. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: matasovaoyu@bmstu.ru).

KOMKIN Aleksandr Ivanovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Ecology and Industrial Safety. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: aik@bmstu.ru).

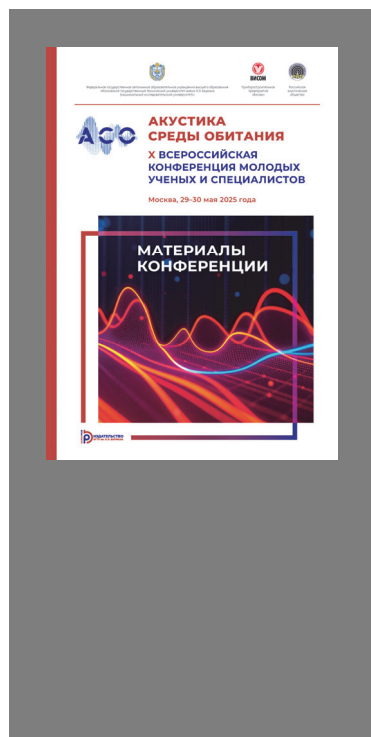
BYKOV Aleksey Ivanovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Ecology and Industrial Safety. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: a.i.bykov@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Матасова О.Ю., Комкин А.И., Быков А.И. Влияние скользящего потока на акустические характеристики резонатора Гельмгольца. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 7, с. 84–94.

Please cite this article in English as:

Matasova O.Yu., Komkin A.I., Bykov A.I. Slip flow influence on acoustic characteristics of the Helmholtz resonator. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 7, pp. 84–94.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям материалы X Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов

«Акустика среды обитания»

В сборник вошли доклады студентов и аспирантов различных вузов России и специалистов из ведущих научных и технических организаций, занимающихся вопросами акустики, представленные на X Всероссийской конференции «Акустика среды обитания», проходившей 29–30 мая 2025 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Рассмотрен широкий круг вопросов, посвященных авиационной акустике, методам и средствам измерения шума, расчетам и проектированию средств защиты от шума в жилой застройке и на производстве.

Для научных работников, специалистов в области акустики, а также широкого круга читателей, интересующихся современными достижениями науки.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>