

УДК: 534.833.5

OECD: 1.03

Расчётно-экспериментальные исследования настройки резонатора Гельмгольца при малых скоростях потока

Коньшина А.С.^{1*}, Матасова О.Ю.², Юдин С.И.³, Надарейшвили Г.Г.⁴¹Инженер-исследователь,²Ассистент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, РФ,³Главный специалист,⁴Д.т.н., заместитель Генерального Директора по науке
^{1,3,4}НАМИ, Москва, РФ

Аннотация

Проведено исследование влияния потока газа на акустические характеристики резонаторов Гельмгольца, применяемых в системе выпуска автомобилей, которое определяется изменением спектра шума выпуска. Интерес представляли режимы холостого хода и начала разгона автомобиля (повышение оборотов и нагрузки двигателя) – скорости потока отработавших газов до 20 м/сек или 0,05 Маха. Целью работы является выявление закономерностей влияния малых скоростей потока отработавших газов на настройку собственной частоты резонатора. Расчётные исследования осуществлены методом конечно-элементного моделирования в программном комплексе Comsol Multiphysics изготовленного образца резонатора Гельмгольца. Представлены экспериментальные результаты замеров акустических характеристик этого резонатора, которые были получены на специально подготовленном стенде, позволяющем проводить акустические испытания с заданием потока воздуха. Полученные значения спектров акустической эффективности резонатора подтвердили теоретические ожидания по изменениям частотных и амплитудных характеристик резонатора, в том числе уменьшение резонансной частоты при малых скоростях потока.

Ключевые слова: расчёт, эксперимент, система выпуска, резонатор, потери передачи

Computational and experimental studies of Helmholtz resonator tuning at low flow rates

Konshina A.S.^{1*}, Matasova O.Yu.², Yudin S.I.³, Nadareishvili G.G.⁴¹Research Engineer,²Assistant Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia,³Chief Specialist,⁴Ph.D., Deputy Director General for Science^{1,3,4}NAMI, Moscow, Russia

Abstract

The influence of the gas flow on the acoustic characteristics of Helmholtz resonators used in the car exhaust system, which is determined by the change in the exhaust noise spectrum, has been studied. Of interest were the modes of idling and the beginning of acceleration of the car (increasing engine speed and load) – the exhaust gas flow rate up to 20 m/ sec or 0.05 Mach. The purpose of this work was to identify patterns of the influence of low exhaust gas flow rates on the tuning of the resonator's natural frequency. Computational studies were carried out using the finite element modeling method in the Comsol Multiphysics software package of a manufactured Helmholtz resonator sample. The experimental results of measurements of the acoustic

*E-mail: alevtina.konshina@nami.ru (Коньшина А.С.)

characteristics of this resonator are presented, which were obtained on a specially prepared stand that allows acoustic tests to be carried out with the specified air flow. The data obtained confirmed theoretical expectations for changes in the frequency and amplitude characteristics of the resonator, including a decrease in the resonant frequency at low flow rates.

Keywords: calculation, experiment, exhaust system, resonator, transmission loss

Введение

Проведено большое количество исследований, посвященных изучению подавления шума разнообразными компонентами, в том числе акустическими резонаторами Гельмгольца [1-3]. Спецификой автомобильных глушителей шума является их функционирование в условиях высокотемпературного газового потока. Варьирование температуры и скорости потока отработавших газов при изменении оборотов и нагрузки двигателя вызывает изменение скорости звука и, как следствие, изменение частотной настройки резонаторов, а присутствие самого потока порождает турбулентности, влияющие как на частотную настройку, так и на амплитуду акустической эффективности как резонаторов, так и всей системы выпуска. Было выполнено большое количество теоретических и экспериментальных исследований по проблеме взаимодействия акустических волн с потоком газовой среды [4, 5]. Выявлено влияние двух противоположных явлений на характеристику резонансной частоты. При преобладании турбулентности смещение собственной частоты резонатора Гельмгольца происходит в область низких частот, а влияние конвективного потока приводит к увеличению резонансной частоты. Полученные результаты позволили применить их в расчетных программах конечно-элементного моделирования типа «Мультифизика», в которых результаты газодинамических расчетов переносятся в акустическую расчетную модель [6].

Анализ информации, представляющей различные математические и расчетные модели резонаторов Гельмгольца и имеющих некоторую экспериментальную сравнительную базу показывает, что рассматриваются скорости потока, превышающие 0,05 Маха (M), а задачей исследования ставится диапазон малых скоростей 5 – 20 м/сек ($M = 0,015 - 0,05$) – диапазон режима холостого хода и начала разгона автомобиля (повышение оборотов и нагрузки двигателя).

В качестве исходной информации принята работа [7], в которой наряду с теоретическими, приводятся экспериментальные результаты исследования классического резонатора Гельмгольца. Было получено следующее изменение параметров настройки резонатора: с увеличением скорости потока пик кривой потерь передач сдвигается в высокочастотную область. При этом амплитуда акустической эффективности уменьшается. В приведенной статье с результатами расчетов и экспериментов также приведены результаты только для скоростей $M = 0$ (без потока), $M = 0,05$ и $M = 0,1$.

Проведение расчетов с геометрией рассмотренного резонатора показало совпадение результатов для $M = 0,05$ и $0,1$, но для небольших скоростей амплитуда пика смещается в низкочастотную область, и смена тенденции к увеличению частоты наблюдается после определенного значения скорости между $M = 0,03$ и $0,04$ (рисунок 1).

Были проведены расчеты настройки резонаторов Гельмгольца с разной геометрией, в том числе по схеме, применяемой в серийной системе выпуска. Результаты подтвердили отмеченную выше тенденцию (рисунок 2).

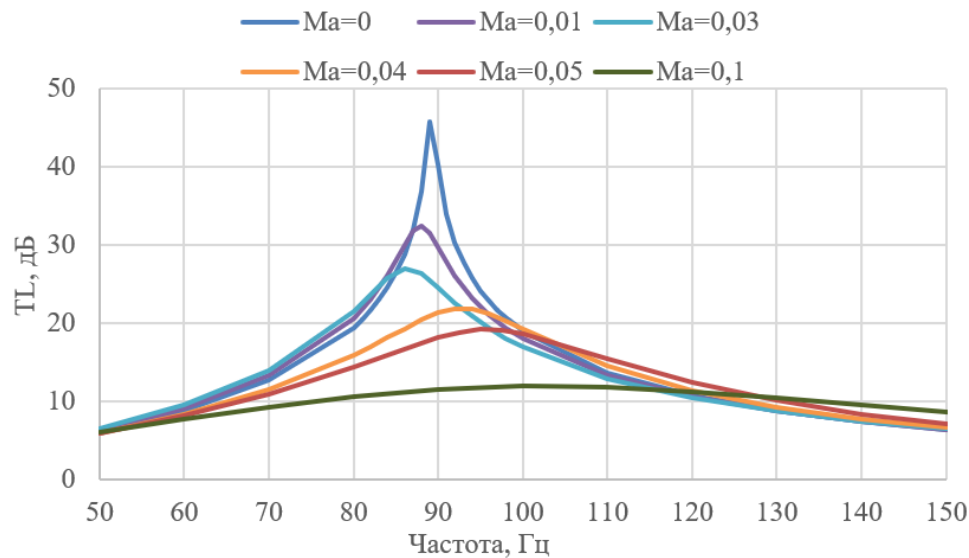


Рисунок 1 – Результаты расчетов резонатора [7] с расширенным диапазоном скоростей

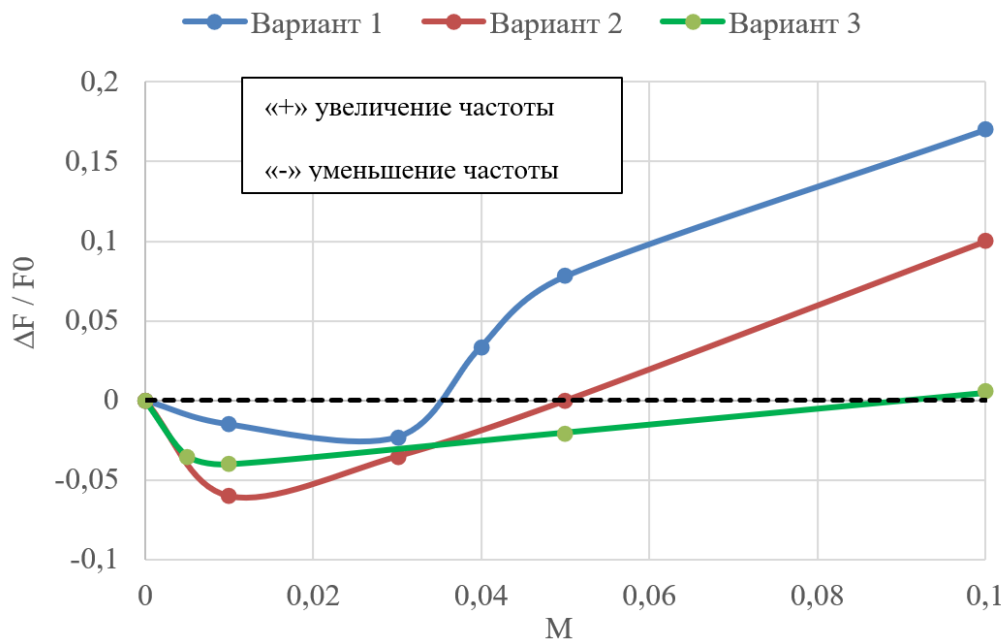


Рисунок 2 – Относительное изменение ΔF резонансной частоты F_0 в зависимости от относительной скорости потока (число Маха)

Приведенные данные расчетов поставили задачу получить экспериментальное подтверждение полученных результатов.

1 Расчёт акустических характеристик резонатора Гельмгольца с учетом потока методом конечных элементов

В качестве опытного образца резонатора Гельмгольца использована готовая конструкция, спроектированная и изготовленная для практического применения на автомобиле. Отрезок выпускной трубы диаметром 76 мм соединен с двумя последовательно расположенными резонаторами Гельмгольца, представляющими из себя цилиндрический объем, соединенный трубкой («горлом резонатора») с трубой. 3D модель опытного резонатора приведена на рисунке 3.

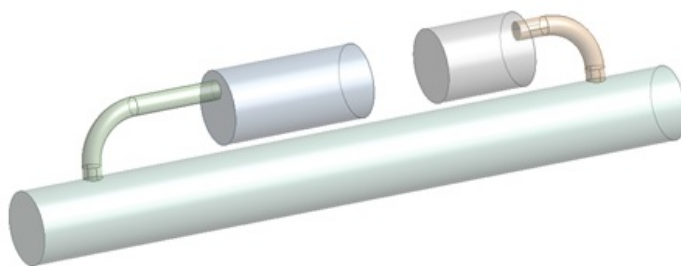


Рисунок 3 – 3D модель опытного образца резонаторов

Расчет акустической эффективности при наличии потока газов проводится с применением расчетного пакета Comsol Multiphysics, в котором последовательно создается расчетная газодинамическая модель с соответствующим разбиением пристеночных вязкостных слоев и размельчением сетки у горла резонатора (рисунок 4), добивается сходимость расчетной модели, полученные газодинамические параметры переносятся на предварительно подготовленную акустическую конечно-элементную модель, в которой проводятся расчеты спектра акустической эффективности TL [6].

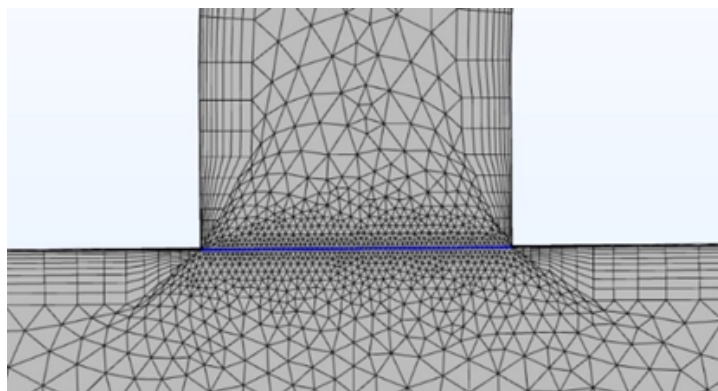


Рисунок 4 – Элемент сетки газодинамических расчетов

Изготовленный опытный образец из двух рядом расположенных резонаторов Гельмгольца представляет из себя довольно сложную акустическую и газодинамическую систему, в которой присутствует взаимное влияние резонаторов. На первом этапе проведен расчет одного резонатора с подробной оценкой влияния потока. На рисунке 5 приведена расчетная модель, на рисунке 6 – результаты акустических расчетов с учетом газодинамики, на рисунке 7 – относительное изменение резонансной частоты в зависимости от скорости потока в сопоставлении с результатами предыдущих расчетов.

Как можно видеть, результаты хорошо согласуются с результатами для других вариантов резонатора Гельмгольца. Уменьшение резонансной частоты наблюдается для всех вариантов геометрии резонаторов от нулевой скорости потока до величин $0,035 - 0,05 - 0,09$ – более $0,1$ Маха. Дальнейшее увеличение скорости потока приводит к увеличению резонансной частоты относительно начальной (без потока).

Кроме определенных сложностей учета взаимовлияния двух рядом расположенных резонаторов Гельмгольца, можно оценить влияние на результат и конструктивных особенностей испытательного стенда. Общий вид стенда приведен на рисунке 8, схема стенда – на рисунке 9. Для исключения влияния выходного акустического импеданса стенда (пересчет на согласованную нагрузку) применялся «метод двух нагрузок» – повторение испытаний с двумя разными акустическими нагрузками (поглотителями) на выходе стенда [8].

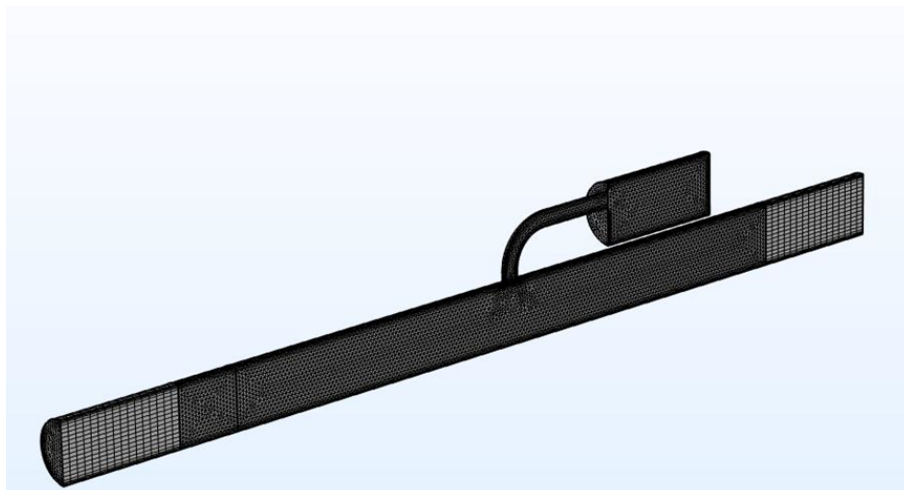


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель

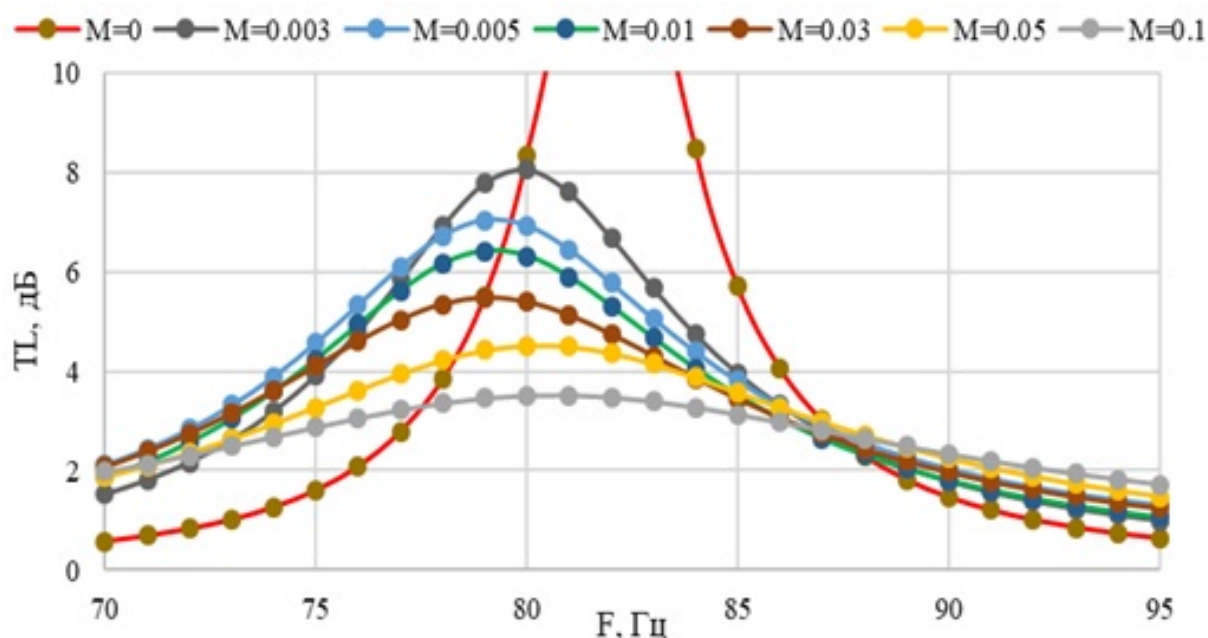


Рисунок 6 – Результаты акустических расчетов первого резонатора Гельмгольца из опытного образца резонаторов

Первый поглотитель выполнен в виде отрезка перфорированной трубы, вокруг которого закреплен расширяющийся конус. Объем между ними заполнен звукопоглотителем. В качестве второго поглотителя применялся пластиковый конус без поглотителя. На входе и выходе резонатора установлены микрофонные блоки с микрофонами 1 и 2 на входе, 3 и 4 на выходе. При обработке измерений применялся известный «метод двух микрофонов» [9], когда по результатам измерений двумя рядом расположенными микрофонами определяется звуковое давление падающей и отраженной волны в комплексном виде и далее определяется спектр акустической энергии W_{in} , входящей в блок резонаторов и спектр акустической энергии W_{out} , выходящей из блока резонаторов. Разность энергий в логарифмическом масштабе и определяет акустический параметр потери передачи TL (Transmission Loss): $TL = 10 \log (W_{in}/W_{out})$.

Особенностью проведенных стендовых испытаний является подача воздуха в измерительный тракт с радиальной составляющей скорости потока (рисунок 10).

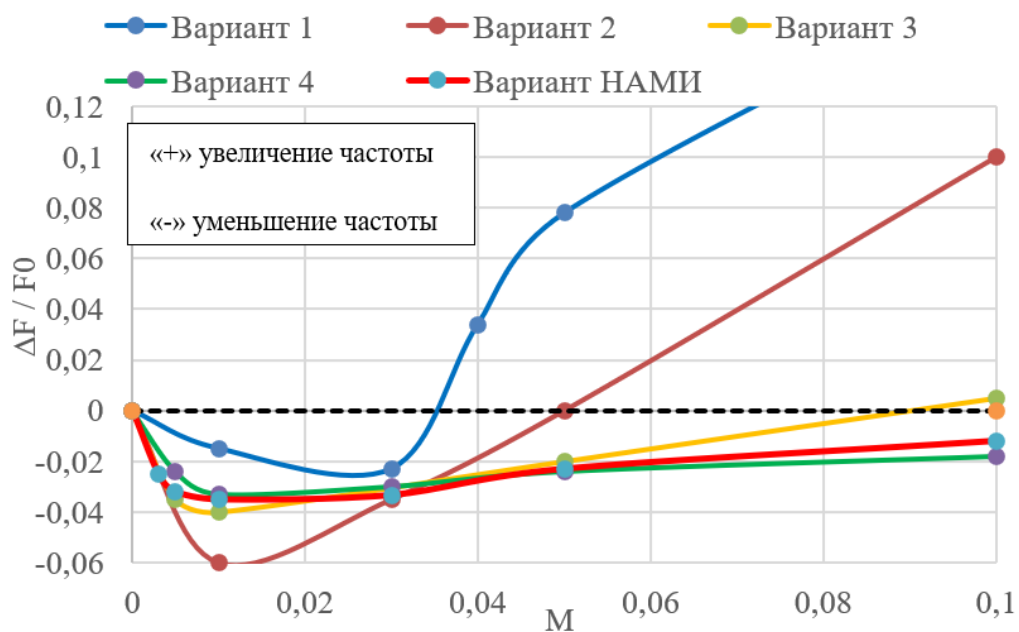


Рисунок 7 – Сравнение относительного изменения резонансной частоты в зависимости от скорости потока (M – число Маха).



Рисунок 8 – Общий вид стенда

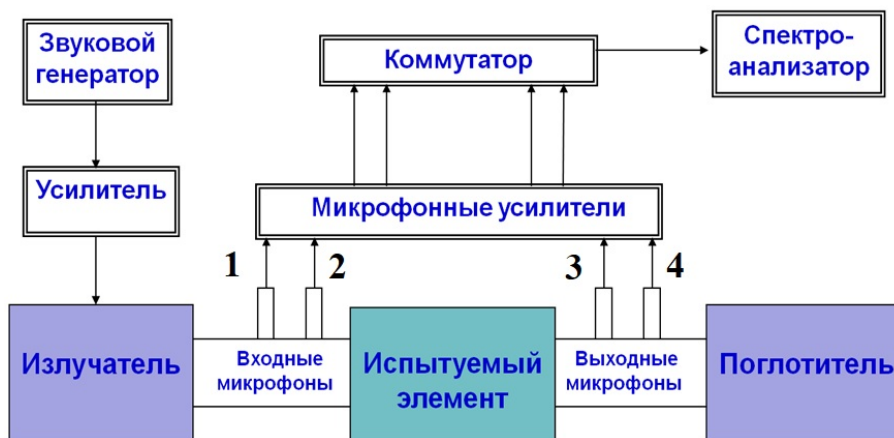


Рисунок 9 – Схема стенда

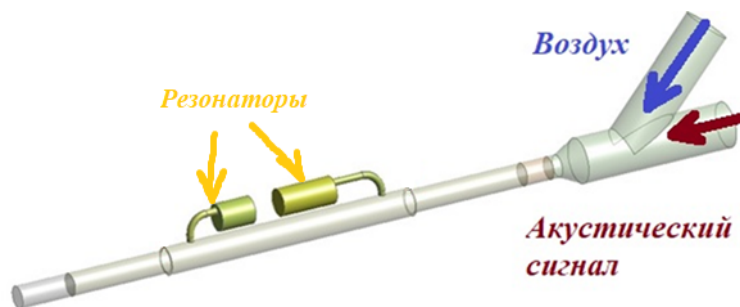


Рисунок 10 – 3D модель стенда

Влияние боковой подачи воздуха в измерительный тракт можно оценить по результатам газодинамического расчета.

Примеры результатов газодинамических расчетов приведены на рисунках 11 – 13.

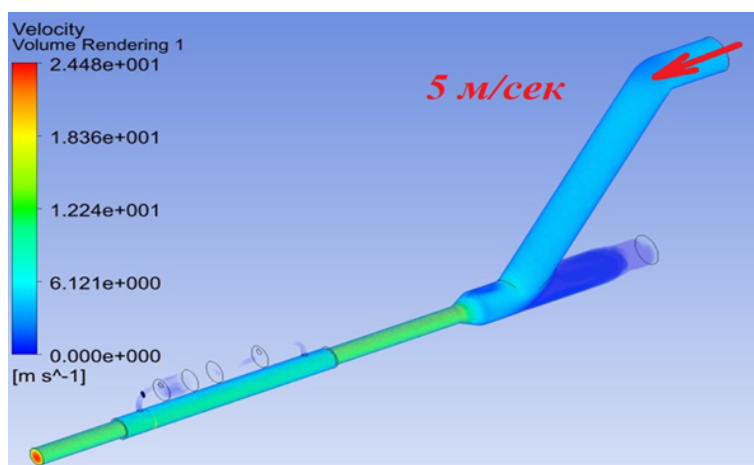


Рисунок 11 – Распределение скорости потока при входной скорости 5 м/сек (средняя скорость потока в волноводе блока резонаторов – 15 м/сек).

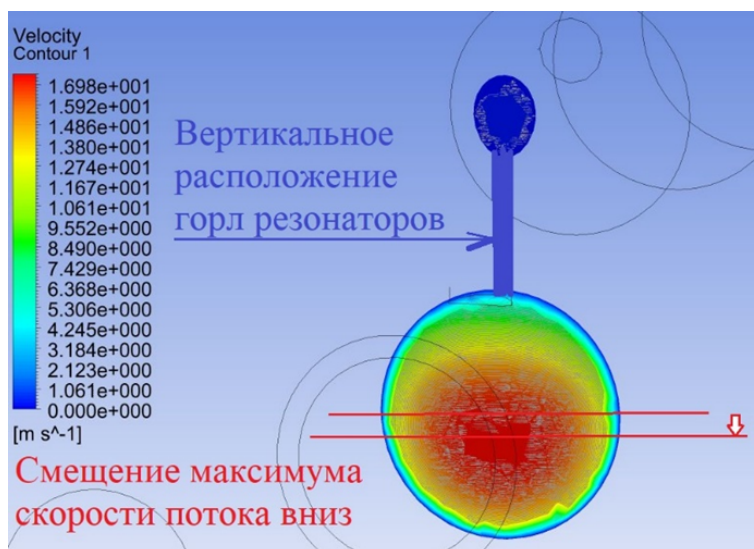


Рисунок 12 – Распределение скорости в сечении, проходящем через горло резонатора. Горла резонаторов расположены по вертикали.

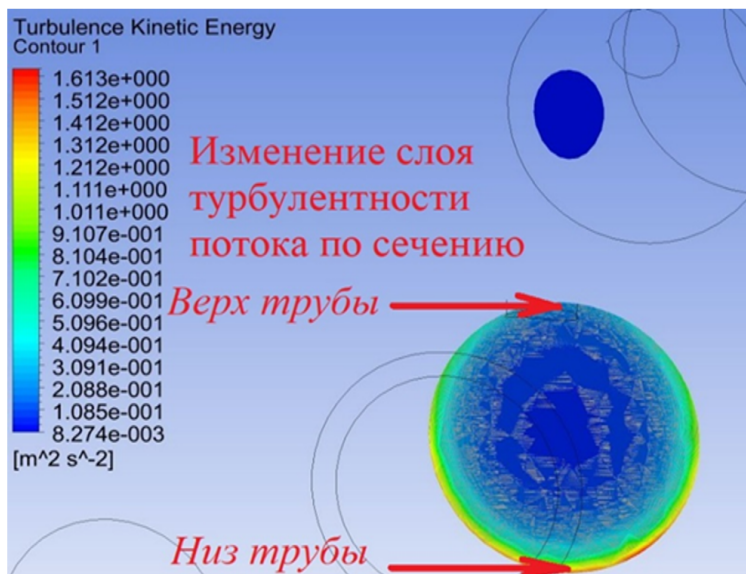


Рисунок 13 – Турбулентная кинетическая энергия (ТКЕ) по сечению волновода.

Вертикальная составляющая скорости подаваемого потока «поджимает» поток к низу труб всего измерительного тракта: смещается максимум скорости потока, а пристеночная турбулентность максимально генерируется у нижней стенки, со средней степенью – у боковых стенок и отсутствует у верхней стенки. Для задания усредненных граничных условий у горл резонаторов можно повернуть резонатор на 90° , расположив горла горизонтально. Результаты расчетов приведены на рисунках 14 и 15.

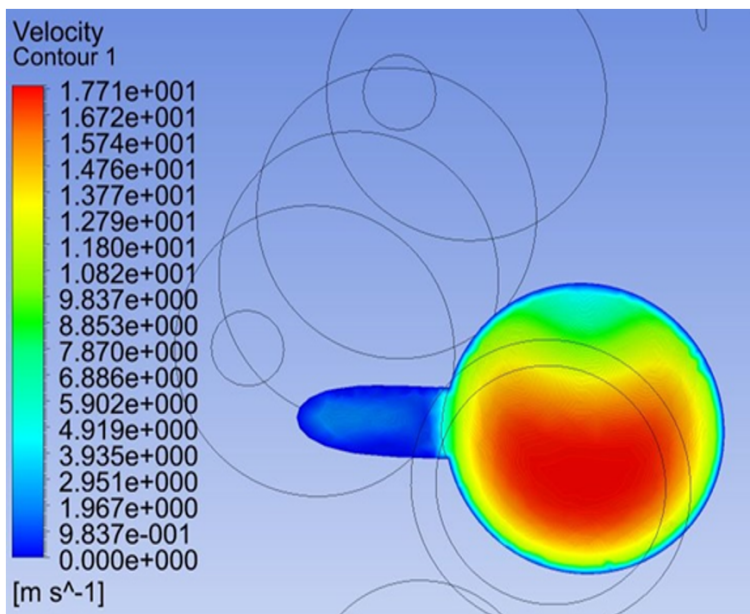


Рисунок 14 – Скорость в сечении. Горла резонаторов – по горизонтали

Как можно видеть, у горл резонаторов оказываются некоторые усредненные параметры потока. При проведении экспериментальных измерений блок резонаторов устанавливался с горизонтальным положением горл.

Результаты расчетов приведены на рисунке 16. Значения скоростей потока обозначены числом Маха и соответствуют:

$$M=0,015 - 5 \text{ м/сек}; M=0,03 - 10 \text{ м/сек}; M=0,06 - 20 \text{ м/сек}.$$

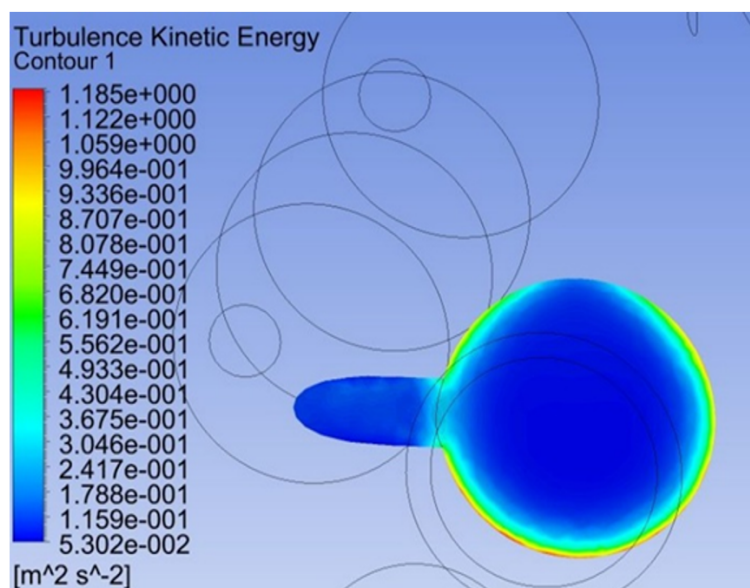


Рисунок 15 – Распределение турбулентности (ТКЕ). Горла резонаторов – горизонтально

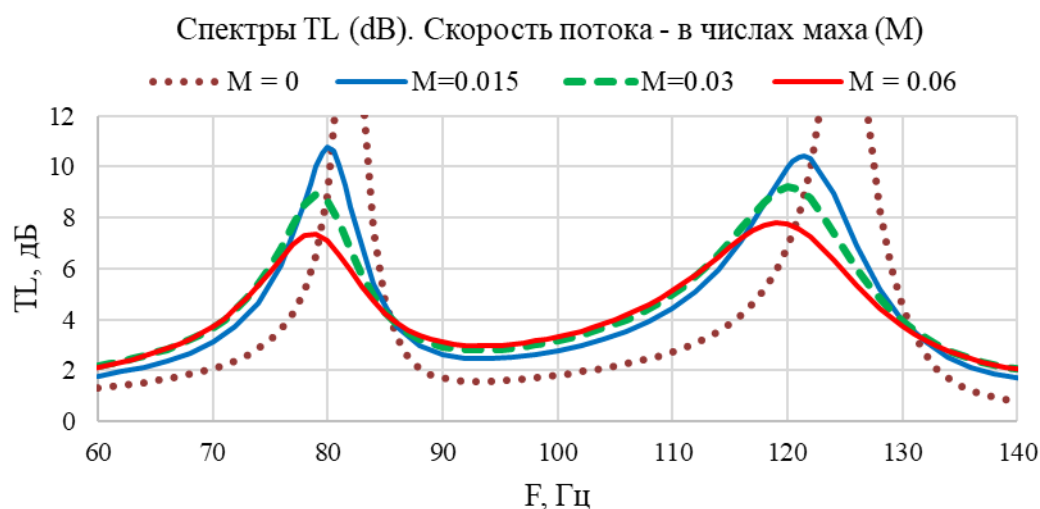


Рисунок 16 – Расчетные спектры TL блока резонаторов с потоком

Резонансные частоты с 82,5 Гц и 126,5 Гц (при $M=0$) сместились в низкочастотную область и прослеживается уменьшение частот с ростом скорости потока. Амплитуды пиков резко уменьшились по сравнению с расчетом без потока и равномерно уменьшаются с ростом скорости.

2 Экспериментальные результаты замеров акустических характеристик резонатора Гельмгольца

Акустическое возбуждение задавалось методом сканирования по частоте в диапазоне 50 – 150 Гц за 2 секунды. Усреднение набиралось не менее, чем по 50 сканированиям. Амплитуда сигнала устанавливалась до достижения коэффициента корреляции между сигналами с двух микрофонов каждого микрофонного блока не менее 0,95 и при максимальной скорости 20 м/сек достигала 120 дБ. Поочередно устанавливались две акустические нагрузки.

Обработка результатов измерений проводилась по математике алгоритма «метода двух микрофонов» и алгоритма «метода двух нагрузок» в единой расчетной программе

в среде MathCAD. Результирующие спектры испытаний приведены на рисунках 17 – 19, результаты испытаний – в таблицах 1 и 2.

Усредненные по результатам всех проведенных испытаний резонансные частоты первого и второго резонатора остаются неизменными (в пределах ошибки измерений) вне зависимости от скорости потока, но сдвинуты в низкочастотную область на 2,5 Гц и 4 Гц соответственно относительно частот без потока. Усредненные по результатам всех проведенных испытаний амплитуды резонансных пиков больше расчетных значений, но повторяют тренд зависимости от скорости потока (рисунок 20).

Расчет по нагрузке №1

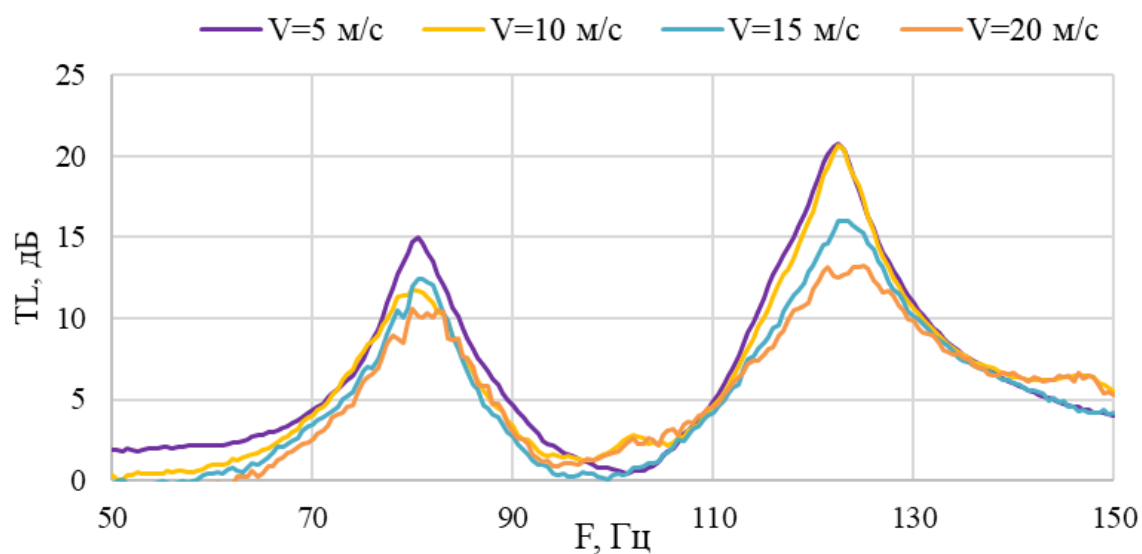


Рисунок 17 – Экспериментально полученные спектры TL . Нагрузка №1

Расчет по нагрузке №2

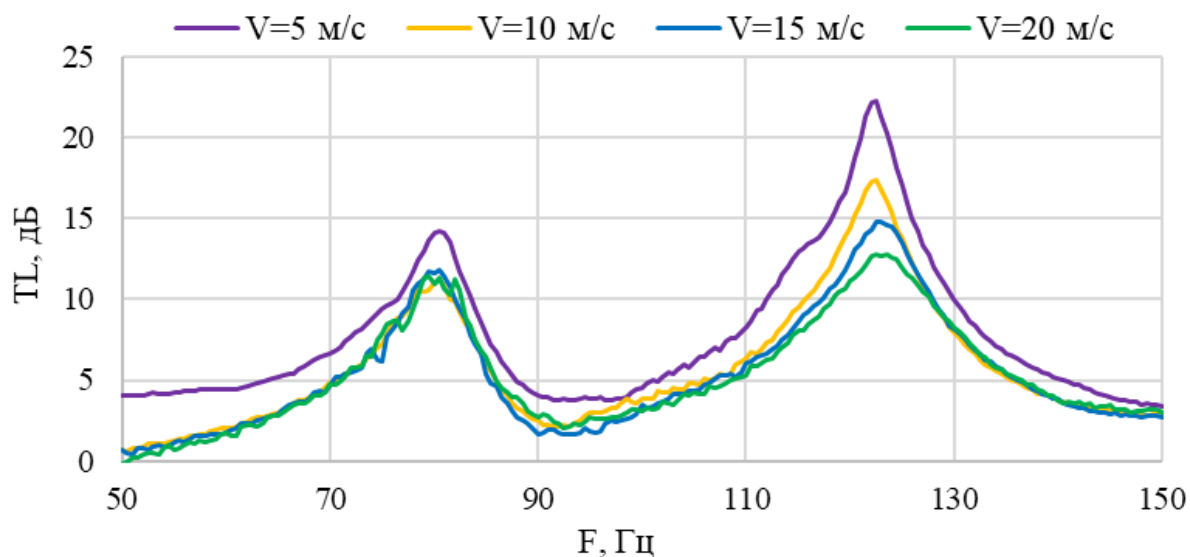


Рисунок 18 – Экспериментально полученные спектры TL . Нагрузка №2

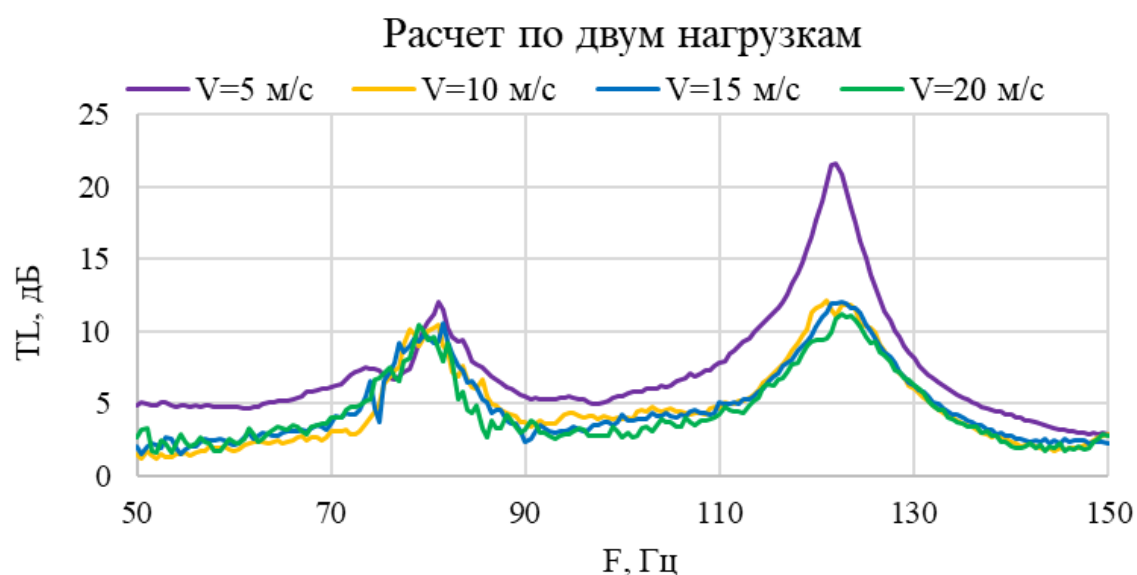


Рисунок 19 – Экспериментально полученные спектры TL. Две нагрузки

Таблица 1 – Результаты испытаний

Метод расчетной обработки результатов измерений	Метод двух нагрузок: № 1 – «Рупор»; № 2 – пластиковый конус.				Одна нагрузка, разделение на падающую и отраженную волну. Нагрузка № 1				Одна нагрузка, разделение на падающую и отраженную волну. Нагрузка №2			
	Резонатор 1		Резонатор 2		Резонатор 1		Резонатор 2		Резонатор 1		Резонатор 2	
Параметр пика: F – частота; A – амплитуда.	F (Гц)	A (дБ)	F (Гц)	A (дБ)	F (Гц)	A (дБ)	F (Гц)	A (дБ)	F (Гц)	A (дБ)	F (Гц)	A (дБ)
Скорость 5 м/сек	81	11	122	21	81	14	123	20	81	13	122	22
Скорость 10 м/сек	80,5	11	122	12	80,5	12	123	20	81	11	122,5	17
Скорость 15 м/сек	80	11	123	12	81	12	124	16	80,5	12	122,5	15
Скорость 20 м/сек	80	11	123	11	82	10	124	13	80	11	123	13

Таблица 2 – Итоговые усредненные результаты

Резонансный пик	Резонатор 1		Резонатор 2	
Параметр пика: F – частота; A – амплитуда	F (Гц)	A (дБ)	F (Гц)	A (дБ)
Скорость 5 м/сек	80,7	13,2	122,2	20,7
Скорость 10 м/сек	80,6	12,2	122,4	18,7
Скорость 15 м/сек	80,5	11,7	123,0	15,2
Скорость 20 м/сек	80,8	11,4	123,2	12,5

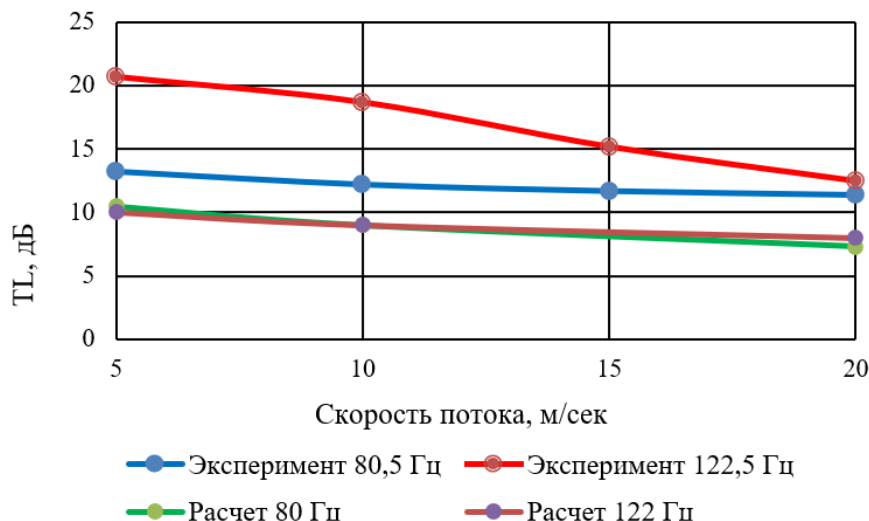


Рисунок 20 – Зависимость амплитуды резонансного пика от скорости потока

Заключение

Результаты расчетов по конечно-элементным моделям пяти вариантов геометрии резонаторов Гельмгольца, в том числе резонатора с горлом «кольцевого типа», примененного в серийном исполнении системы выпуска, показали сдвиг резонансной частоты при малых скоростях потока в область низких частот с дальнейшим увеличением частоты с увеличением скорости потока.

Полученные результаты испытаний опытного блока резонаторов подтвердили сдвиг резонансной частоты резонаторов Гельмгольца в низкочастотную область при наличии потока с небольшой скоростью до 20 м/сек по сравнению с испытаниями без потока.

Величина сдвига по частоте совпадает с расчетными значениями в пределах ошибки измерений и расчетов.

Отличие экспериментальных значений амплитуд пиков в зависимости от скорости потока от расчетных объясняется спецификой конструкции стенда и опытного блока резонаторов:

- подача потока воздуха в акустический измерительный тракт с радиальной составляющей скорости потока;
- применением в опытном блоке резонаторов двух рядом расположенных резонаторов Гельмгольца, соединения горл которых с волноводом расположены рядом со стыком с микрофонными блоками.

Список использованных источников

1. Guan D., Zhao D., Ren Z. Aeroacoustic Attenuation Performance of a Helmholtz Resonator with a Rigid Baffle Implemented in the Presence of a Grazing Flow // International Journal of Aerospace Engineering. – 2020. – P. 1–16. DOI: 10.1155/2020/8814039
2. Крылова А.С., Юдин С.И., Глазков А.О., Надарейшвили Г.Г. Расчётные исследования настройки резонатора Гельмгольца, в конструкции которого волновод и горло резонатора находятся внутри объёма резонатора, с целью снижения уровня шума автомобиля // Труды НАМИ. – 2024. – № 3 (298).

3. Крылова А.С., Глазков А.О., Надарейшвили Г.Г., Юдин С.И. Расчётное исследование настройки совместно работающих резонаторов Гельмгольца // Акустика среды обитания. – 2024. – С. 226–236.
4. Kim H., Selamet A. Acoustic performance of a Helmholtz resonator with flow // International journal of vehicle noise and vibration. – 2011. – V. 7. – №. 4. – P. 285-305.
5. Kierkegaard, S. Boij, G. Efrainsson, A frequency domain linearized Navier-Stokes equations approach to acoustic propagation in flow ducts with sharp edges // Journal of the Acoustical Society of America – 2010. - V. 127. – P. 710-719.
6. Helmholtz Resonator with Flow: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.comsol.com/model/download/737381/models.aco.helmholtz_resonator_with_flow.pdf (05.03.2022).
7. Selamet E., Dickey N.S., Novak J.M. Effect of flow on Helmholtz resonator acoustics: a three-dimensional computational study vs. experiments // SAE Technical Paper. – 2011. – № 2011-01-1521. DOI: 10.4271/2011-01-1521.
8. Seung-Ho Jang and Jeong-Guon Ih. Refined multiloop method for measuring acoustical source characteristics of an intake or exhaust system// Journal of the Acoustical Society of America. – 2000. – V. 107 (6). – P. 3217-3225.
9. J.Y. Chung and D.A. Blaser. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory // Journal of the Acoustical Society of America. – 1980. – V. 68. – P. 914-921.

References

1. Guan D., Zhao D., Ren Z. Aeroacoustic Attenuation Performance of a Helmholtz Resonator with a Rigid Baffle Implemented in the Presence of a Grazing Flow // International Journal of Aerospace Engineering. – 2020. – P. 1–16. DOI: 10.1155/2020/8814039
2. Krylova A.S., Yudin S.I., Glazkov A.O., Nadareishvili G.G. Computational studies of Helmholtz resonator tuning where the waveguide and resonator neck are located inside the resonator volume for automotive noise reduction // NAMI Proceedings. – 2024. – № 3 (298).
3. Krylova A.S., Glazkov A.O., Nadareishvili G.G., Yudin S.I. Computational study of tuning cooperatively working Helmholtz resonators // Habitat Acoustics 2024. – 2024. – P. 226–236.
4. Kim H., Selamet A. Acoustic performance of a Helmholtz resonator with flow // International journal of vehicle noise and vibration. – 2011. – V. 7. – №. 4. – P. 285-305.
5. Kierkegaard, S. Boij, G. Efrainsson, A frequency domain linearized Navier-Stokes equations approach to acoustic propagation in flow ducts with sharp edges // Journal of the Acoustical Society of America – 2010. - V. 127. – P. 710-719.
6. Helmholtz Resonator with Flow: [Electronic resource]. – URL: https://www.comsol.com/model/download/737381/models.aco.helmholtz_resonator_with_flow.pdf (05.03.2022).
7. Selamet E., Dickey N.S., Novak J.M. Effect of flow on Helmholtz resonator acoustics: a three-dimensional computational study vs. experiments // SAE Technical Paper. – 2011. – № 2011-01-1521. DOI: 10.4271/2011-01-1521
8. Seung-Ho Jang and Jeong-Guon Ih. Refined multiloop method for measuring acoustical source characteristics of an intake or exhaust system// Journal of the Acoustical Society of America. – 2000. – V. 107 (6). – P. 3217-3225.
9. J.Y. Chung and D.A. Blaser. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory // Journal of the Acoustical Society of America. – 1980. – V. 68. – P. 914-921.