

УДК: 534.83
OECD: 01.03.AA

Особенности расчета элементов глушителей шума при наличии потока

Матасова О.Ю.^{1*}, Комкин А.И.², Быков А.И.³

¹ Ассистент, ² Д.т.н., профессор, ³ К.т.н., доцент

^{1,2,3} Кафедра «Экология и промышленная безопасность»

^{1,2} Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, РФ

³ Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, РФ

Аннотация

Проведен анализ работ по использованию численных расчетов реактивных глушителей шума при наличии потока, которые проводились в программных комплексах ANSYS Fluent, OpenFOAM, COMSOL Multiphysics. Проанализировано влияние моделей турбулентного потока (RANS, LES) на результаты численных расчетов. Рассмотрены особенности моделирования методом конечных элементов реактивных глушителей с потоком в программной среде COMSOL Multiphysics, касающиеся задания граничных условий и разбиения расчётной области на конечные элементы. Приведены примеры применения RANS модели для расчета акустических характеристик типовых реактивных глушителей шума, в качестве которых была рассмотрена простая камера расширения, а также камера расширения с вдвинутым внутрь камеры патрубком, образующим четвертьволновый резонатор. Поведена оценка влияния воздушного потока в глушителе на потери передачи реактивных глушителей.

Ключевые слова: МКЭ, глушители шума, моделирование, расчет, потери передачи.

Features of calculation of reactive mufflers in the presence of a flow

Matasova O.Yu.^{1}, Komkin A.I.², Bykov A.I.³*

¹ Assistant, ² DSc, Professor, ³ PhD, assistant professor

^{1,2,3} Department of Ecology and Industrial Safety

^{1,2} Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³ National Research University 'Moscow Power Engineering Institute', Moscow, Russia

Abstract

The analysis of works devoted to the use of numerical calculations of reactive noise mufflers in the presence of medium flow, which were carried out in the ANSYS Fluent, OpenFOAM, COMSOL Multiphysics software packages, is presented. The influence of turbulent flow models, Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) and Large Eddy Simulation (LES), on the results of numerical calculations is analyzed. The features of finite element modeling of mufflers with medium flow in the COMSOL Multiphysics software environment are considered, regarding the settings of boundary conditions and the meshing of the computational domain into finite elements. Examples of using the RANS model to calculate the acoustic characteristics of typical reactive noise mufflers are given, for which cases of simple expansion chamber and an expansion chamber with an extended inlet pipe which forms a quarter-wave resonator were considered. An assessment of the influence of medium flow in the muffler on transmission losses of reactive mufflers is made.

*E-mail: matasovaoyu@bmstu.ru (Матасова О.Ю.)

Keywords: *finite element method, noise muffler, simulation, numerical calculation, transmission loss.*

Введение

Шумовое загрязнение окружающей среды остается одним из наиболее актуальных проблем последних десятилетий в связи с ростом числа источников шума и технологического прогресса. В связи с усложнением технологических процессов и ростом их числа проектирование механических устройств требует строгого экологического нормирования, которое для снижения и контроля шума становится все более сложной задачей. Для осуществления контроля и ослабления шума в промышленности распространение звука в акустических устройствах остается актуальной темой исследований. В настоящий момент наибольшее число шумовых источников загрязнения в среде обитания современного человека является шум транспортных средств, в особенности впускная и выпускная системы автомобилей. Для снижения нагрузки шумового воздействия от данного типа источников шума на окружающую среду применяются различные глушители шума, способствующие снижению негативного воздействия и созданию комфортных условий жизни людей в современных городах. В настоящее время существует большое количество исследований по изучению акустических свойств различных элементов глушителей шума, включающих в себя экспериментальные и аналитические методы. Отличительной особенностью автомобильных глушителей шума является их работа в условиях высоких уровней звукового давления и при наличии высокотемпературного газового потока. Движение такого потока усложняет задачу и прогнозирование результатов эффективности проектируемых глушителей шума в связи с изменением скорости звука, а также с дополнительными потерями звуковой энергии на вязкость и трение в динамической газовой среде. Большая часть исследований, посвящённых проектированию и расчету глушителей шума не уделяет должного внимания наличию газодинамического потока и его влиянию на эффективность снижения шума. Вместе с тем, как показали Альфредсон и Дэвис еще в 1970-1971 годах [1], при расчетах автомобильных глушителей шума можно использовать линейную акустическую теорию, но при этом поток в глушителе учитывать необходимо.

Изучением взаимодействия акустической волны и газодинамического потока занимаются с середины XX века, имеющим сложности в описании физических процессов. Требуются обширные знания в области акустики и гидрогазодинамики, на стыке которых и возникает основная сложность при решении рассматриваемой проблемы. Основная часть исследований, посвященных изучению влияния газодинамического потока на звуковую волну посвящена аналитическим методам [2-6]. Исследования, посвященные расчету типовых элементов глушителей шума с учетом газодинамического потока аналитическими методами в числе первых, проводилась М.Л. Муниалом [4-6]. В его работах рассматривался осредненный газодинамический поток, характеризующийся числом Маха M . В работах М.Л. Муниала и других авторов были математически описаны наиболее распространенные (типовые) элементы реактивных глушителей шума с учетом низкоскоростного осредненного потока ($M \leq 0,1$) в терминах передаточных матриц. Метод передаточных матриц позволяет рассчитывать акустические характеристики и более сложных глушителей шума, если их конфигурацию можно представить в виде последовательного соединения типовых элементов. В качестве показателя эффективности снижения шума глушителями наиболее часто используется такая характеристика, как потери передачи TL , которая определяется через логарифм отношения звуковой мощности

падающей волны на входе глушителя W_{in} к звуковой мощности звуковой волны на выходе W_{out} из глушителя при наличии там согласованной (безэховой) нагрузки:

$$TL = 10lg \frac{W_{in}}{W_{out}}, \text{ дБ.}$$

В настоящее время уровень развития численного моделирования позволяет решать многие задачи технической акустики, в том числе и сложные междисциплинарные задачи, включающие взаимодействия акустической волны и газодинамического потока, которые ранее были не решаемыми. Возможность использования численных методов для решения подобных задач отмечалась уже давно, но стала возможной только сейчас, в связи с появлением мощной вычислительной техники и программных комплексов для решения мультифизических процессов, включающих комплексы вычислительной гидрогазодинамики (CFD) и вычислительной акустики, численные методы моделирования, основанные на методах конечных и граничных элементов, ставшие находить широкое применение в исследовательской практике [7-16]. Так в [7] авторы разрабатывали новый вычислительный модуль в программе OpenFOAM для исследования потерь передачи TL элемента глушителя при наличии потока. В процессе исследования они оценили эффективность разработанного вычислительного модуля на примере камеры расширения и сравнили результаты частотной характеристики TL с экспериментальными данными. Особенностью моделирования было проведение расчета с временной реализацией звукового сигнала, которое переводилось в частотную область с помощью преобразований Фурье (FFT). Похожий расчет проводился в [8] в программном комплексе ANSYS Fluent на примере перфорированного глушителя шума при наличии и отсутствии потока с реализацией во временной области, требующей значительных затрат вычислительных ресурсов, чем в частотной области. Далее аналогичным образом полученные результаты преобразовывались в частотную область и определялись потери передачи TL глушителя. Полученные авторами результаты численного расчета хорошо коррелируют с данными, полученными экспериментальным методом.

Целью настоящей научной работы является сравнение акустических характеристик камер расширения, простой и модифицированной четвертьволновым резонатором, в условиях наличия газодинамического потока среды различной скорости в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

1. Моделирование потока среды численным методом

При проведении численных расчетов акустических характеристик элементов глушителей в условиях наличия потока проводящей среды методом конечных элементов (МКЭ) важную роль играет выбор математической модели турбулентности. На настоящий момент существует три основные газодинамические модели турбулентности, отличия в которых позволяют варьировать точностью и скоростью решения поставленной задачи.

Принципиально в моделировании турбулентного течения среды можно выделить две основные составляющие процесса: регулярное движение, оно как правило описывается осредненными по рассматриваемому сечению скоростями, и наложенного на него хаотично пульсирующего течения, которое и приводит к формированию нерегулярных флуктуаций. Замечательным математическим инструментом описания возникающих в потоке вихревых профилей в зависимости от характеристик потока являются уравнения Навье-Стокса, они и лежат в основе вышеупомянутых моделей.

Наиболее точным и в то же время наиболее затратным подходом, как с энергетической, так и с временной точки зрения, является прямое решение уравнений

Навье-Стокса (DNS – *Direct Numerical Simulation*). Неоспоримым преимуществом такого подхода является, конечно же, возможность просчитать распространение и диссипацию сравнительно малых вихрей на фоне крупных. Очевидно для эффективного использования такого способа описания турбулентности требуется очень подробное разбиение, что в наше время пока еще представляется существенной проблемой для современных компьютеров.

Исходя из необходимости снижения вычислительной нагрузки и возник следующий подход – метод больших вихрей (LES – *Large Eddy Simulation*). В данном подходе пренебрегают мелкими флуктуациями, что позволяет оптимизировать расчет и увеличить минимально необходимый размер сетки разбиения модели. Следует отметить, что общая точность расчета в рамках принятого допущения страдает не сильно, так что результаты, полученные при таком подходе, можно считать весьма точными. Тем не менее подобного рода расчеты требуют значительного времени и могут быть использованы только для расчета нестационарных течений в трехмерных решателях во временной области. На рисунке 1 представлена картина распределения скорости потока в камере расширения LES методом.

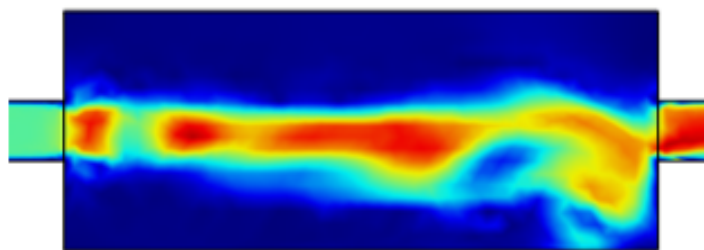


Рис. 1. Расчет распределения скорости потока в камере расширения LES методом

Подходом, который получил наибольшее распространение при решении задач турбулентных течений, является решение уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу (RANS – *Reynolds – averaged Navier – Stokes*). Его неоспоримым преимуществом и достоинством является возможность проведения расчета в условиях ограниченных вычислительных мощностей – жертвуя точностью можно обсчитать достаточно масштабные задачи и, более того, получить решение в виде стационарной картины течений. Впрочем, это снижает точность численных результатов и к ним нужно относиться с осторожностью – в случае рассмотрения каналов сложной геометрии. Даже при использовании весьма подробных сеток можно получать существенные расхождения с экспериментами. В качестве примера ниже приведен результат расчета скорости течения среды в камере расширения методом RANS, рисунок 2. Здесь в отличие от расчета методом LES имеет место быть осесимметричная картина развития потока в канале, что является следствием упрощенного расчетного подхода в RANS методе.

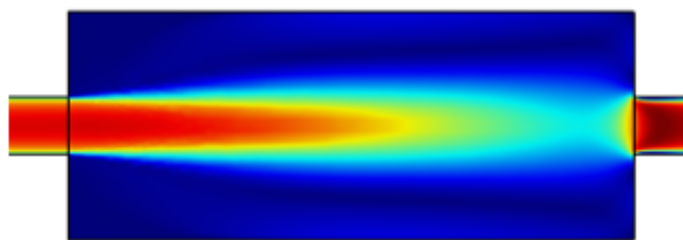


Рис. 2. Расчет распределения скорости потока в камере расширения RANS методом

В подтверждение вышесказанного можно привести в пример результаты полученные в [7]. Авторы работы рассчитывали потери передачи TL камеры расширения в условиях наличия потока. Оказалось, что при скоростях потока не превышающих 10 м/с, LES модель демонстрировала лучшее схождение с экспериментом, чем RANS. Очевидно, это в первую очередь стоит связывать с более точным расчетом потерь звуковой энергии в условиях формирования большого числа завихрений в потоке. Само же ограничение в 10 м/с исходило из вычислительных возможностей методом LES, RANS в свою очередь позволял рассчитывать ту же модель и при скоростях 90 м/с.

Одним из программных комплексов подходящих для расчета глушителей шума при наличии потока с данными скоростными режимами является COMSOL. Далее в работе представлены результаты расчета двух камер расширения, одна из которых модифицирована четвертьволновым резонатором, при разных скоростях потока среды.

2. Создание сетки конечно-элементных моделей

В COMSOL Multiphysics построены 3D модели камеры расширения и четвертьволновый резонатор, схемы которых представлены на рисунке 3. При этом используется трехмерная модель для выявления особенностей вихревой структуры потока. В связи с тем, что рассматриваемые конфигурации глушителей являются осесимметричными, поведение численных расчетов может быть упрощено и потребует существенно меньше вычислительных затрат.



Рис. 3. Схемы камеры расширения (а) и четвертьволнового резонатора (б)

Для повышения точности численных расчетов используются две структурированные сетки с подробным разбиением пристеночных слоев. В случае расчета параметров потока используется более подробная сетка, так как требуется высокая точности CFD расчетов. Построение сеток производится по следующему алгоритму:

1. Структурирование моделей исследования осуществляется с помощью функции самостоятельной настройки сеток (*User controlled mesh*).

2. Размер элементов сетки задается в разделе *Size*. Для расчета акустической волны в потоке используется сетка с размерами 3-8 мм, эти значения задаются исходя из максимальной частоты расчета в акустике – 3 000 Гц. В этом случае на каждую длину волны приходится не менее 14 элементов сетки, что позволяет снизить рассчитанные ошибки при распространении волн к минимуму.

3. При расчете скользящего потока размер элементов варьируется в пределах 1-5 мм. Этот диапазон выбран на основании рекомендации, что размеры элементов для расчета потока должны быть меньше, чем для акустических расчетов. Такой подход позволяет повысить точность получаемых при проведении численных расчетов результатов.

4. Для расчета в пристеночных слоях используется функция *Boundary Layers*, позволяющая сделать сетку более подробной в данной области с заданием числа слоев, создаваемую для более детального учета потери на вязкость и трение. Для расчета параметров потока используется разбиение на 8 пристеночных слоев, в акустическом расчете 5 слоев.

Параметры воздушного потока, полученные на сетке CFD, переносятся на сетку для акустического расчета. Обе сетки модели камеры расширения в качестве примера представлены на рисунке 4.

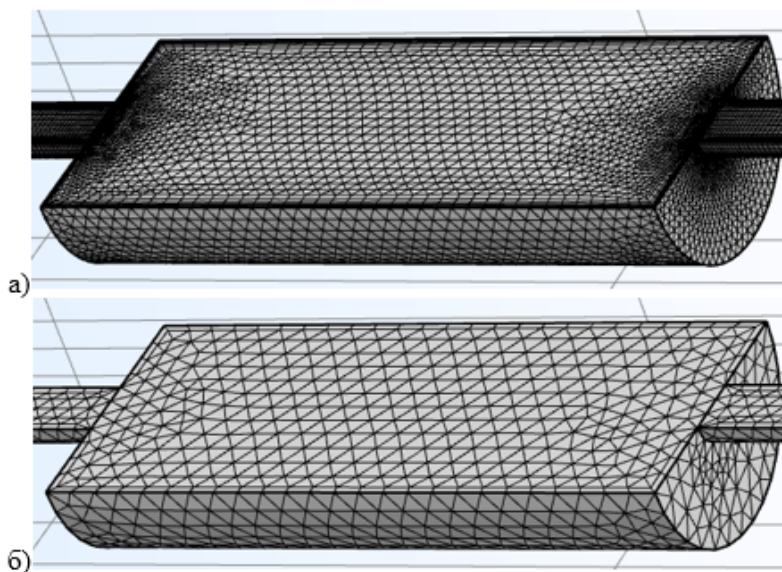


Рис. 4. Гидравлическая (а) и акустическая (б) расчетные сетки для камеры расширения

3. Особенности расчета глушителей шума с учетом потока в COMSOL Multiphysics

Моделирование камерных ячеек рассматриваемой конфигурации в COMSOL Multiphysics с наличием потока среды методом RANS производится с помощью мультифизической функции (*Background Fluid Flow Coupling*), связывающей между собой два модуля физики: турбулентного потока (*Turbulent Flow*) и линеаризованных уравнений Навье-Стокса в частотной области (*Linearized Navier – Stokes, FrequencyDomain*), Мультифизика позволяет наложить на газодинамический поток акустические волны. Получение требуемых результатов делиться на три этапа. В

первую очередь производится гидравлический расчет турбулентного потока в модуле физики *Turbulent Flow* методом RANS. В данном расчете используется подробная сетка с мелким шагом разбиения и детальным делением пристеночных слоев, требующихся для учета потерь на вязкость и трение, влияющих на точность конечного результата. Граничные условия по входному сечению задаются через осредненное значение скорости потока среды (*Fully developed flow*). На выходном сечении граничное условие задается через нулевое давление относительно значения атмосферного. На втором этапе расчетов подключается физический модуль *Linearized Navier – Stokes, Frequency Domain*, связывающийся с расчетом гидравлики мультифизической функцией *Background Fluid Flow Coupling* с помощью переноса данных первого этапа на акустическую сетку. На заключительном этапе производится акустический расчет с наличием потока среды в частотном диапазоне с использованием результатов расчетов и переноса данных с предыдущих шагов. Для данного расчета на входном и выходном участках трубопроводов, присоединенных к камере расширения двух конфигураций, создаются условия согласованной нагрузки при помощи согласованных слоев (*Perfectly Matched Layer*). Акустическая волна задается при помощи *Background Acoustic Fields*, где указывается амплитуда звуковой волны и распространение колебательной скорости по осям координат. В этом модуле физики есть некоторые из предполагаемых предположений, например, что поток без потерь, вязкие и адиабатические эффекты пренебрежимо малы, так что акустическое поле может быть описано звуковым давлением p [Па], определяемым волновым уравнением:

$$\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) = 0,$$

где ρ_0 – плотность среды, кг/м³; t – время, с; c – скорость звука, м/с. В случае рассмотрения гармонических звуковых волн волновое уравнение можно привести к известному уравнению Гельмгольца.

В численных расчетах используются три основных граничных условия (рис 5): твердые границы, которые проявляются в виде наличия прочных твердых стенок; это условие требует, чтобы нормальная скорость колебаний частицы была равна нулю; как уже упоминалось ранее, входное отверстие глушителя имеет специальное граничное условие, которое позволяет распространяться звуковой волне через оба конца модели, что обеспечивает условия полного поглощения. Справедливости ради следует отметить, что условие выхода из глушителя в COMSOL Multiphysics может быть реализовано по-разному, но все они соответствуют условию согласованной нагрузки $Z = \rho c$.

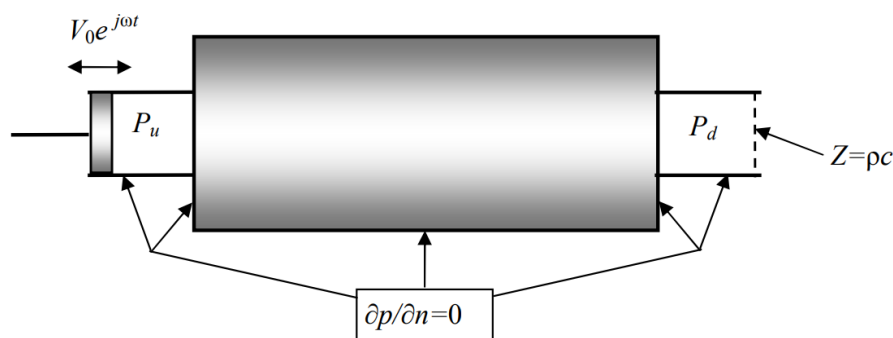


Рис. 5. Основные граничные условия рассматриваемых в акустическом модуле глушителя

4. Результаты расчетов

В исследуемых камерных ячейках: классической камере расширения и модификации с четвертьволновым резонатором, поток среды принимается как слабо сжимаемый в скоростных диапазонах 5-30 м/с. По итогам численных расчетов трех этапов, описанных ранее определяются частотные характеристики потери передачи TL для каждой рассчитанной скорости. Для классической камеры расширения длиной 200 мм и диаметром 80 мм с входным и выходным патрубками по 20 мм в диаметре, результаты расчета ее потерь передачи представлены на рисунке 6.

Как показывают результаты расчета, наличие потока вызывает некоторое увеличение эффективности снижения шума, которое хорошо прослеживается на максимальных значениях потери передачи TL камеры расширения и которое тем больше, чем больше скорость потока и частота звука. Это явление связано с наличием потерь на трение в турбулентном потоке в глушителе. Следует обратить внимание на одну особенность полученных результатов, связанную с тем, что на низких частотах появляется флуктуация на кривой потерь передачи, которая появляется при скорости потока 10 м/с, а при скорости 30 м/с и выше становится очень существенной. Причина появления таких флуктуаций, причем только на низких частотах, непонятна и, по-видимому, связана с особенностями проведения подобных расчетов в пакете COMSOL Multiphysics.

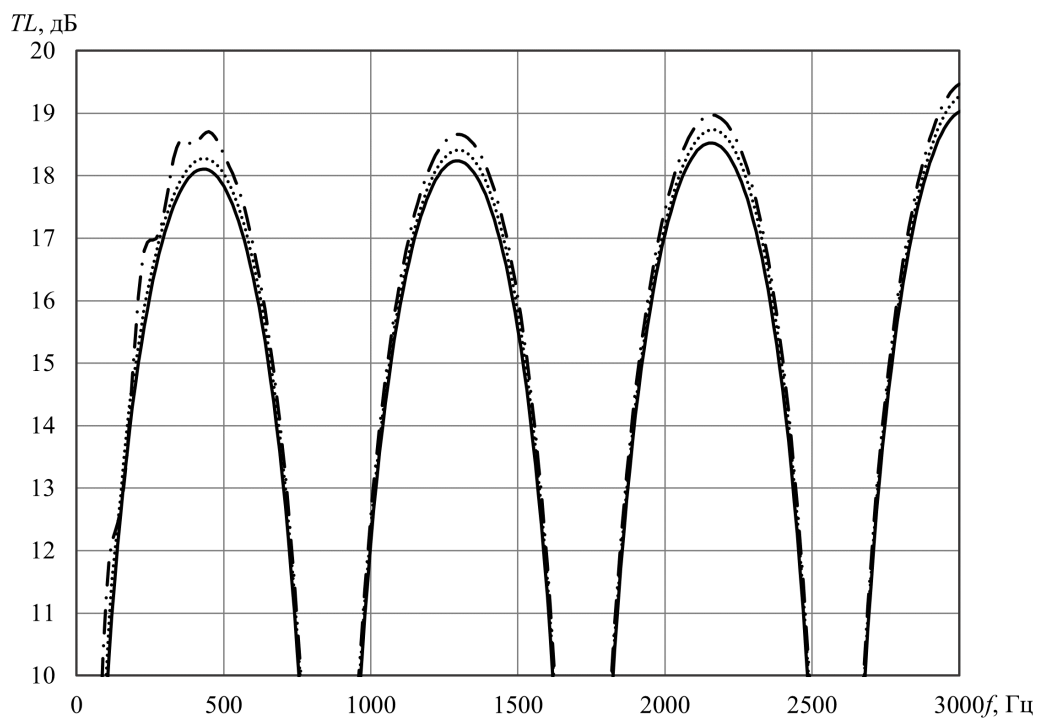


Рис. 6. Потери передачи камеры расширения для различных скоростей скользящего потока: $V=0$ м/с (—); $V=15$ м/с (....); $V=30$ м/с (—·—)

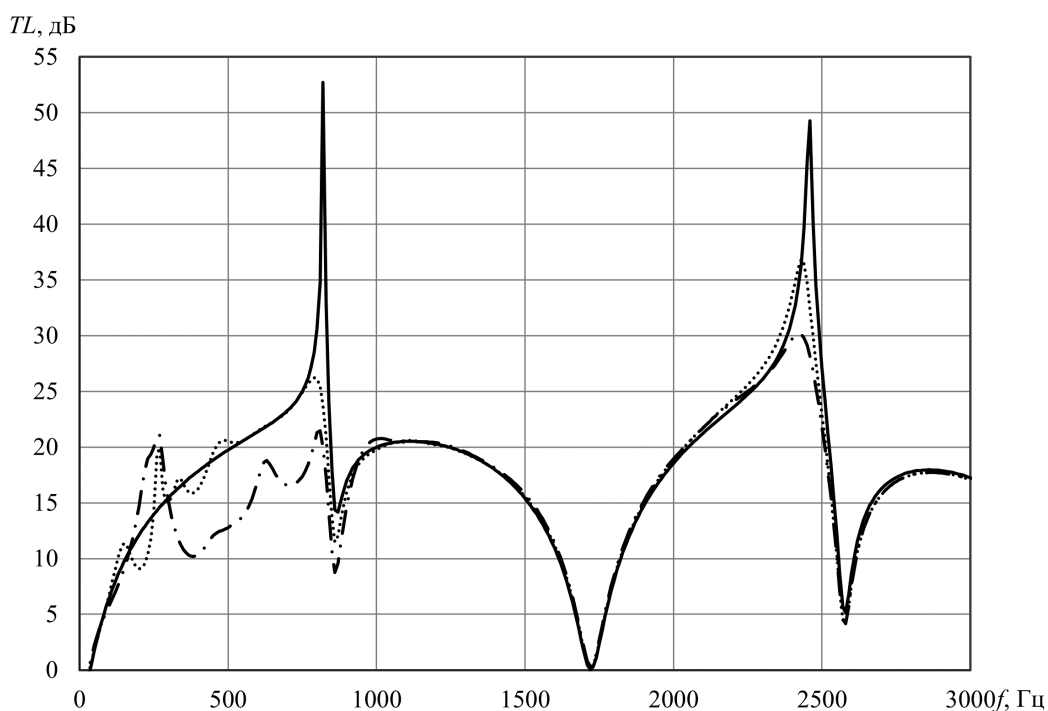


Рис. 7. Потери передачи камеры расширения с четвертьволновым резонатором для различных скоростей скользящего потока: $V=0$ м/с (—); $V=15$ м/с (....); $V=30$ м/с (—·—)

В случае расчета камеры расширения с такими же геометрическими параметрами, что и в первом случае, но модифицированную четвертьволновым резонатором, представляющим собой введенную входную трубу до середины ее длины, были получены результаты характеристики потерь передачи представлены на рисунке 7 для тех же скоростей потока среды. При расчете характеристик обеих камер численные расчеты имеют идентичные результаты в сравнении с аналитическим методом расчета. Как показывают графики на рисунке 7, появление потока в глушителе и увеличение его скорости приводит к снижению потерь передачи глушителя на резонансных частотах по сравнению со случаем отсутствия потока. Эта закономерность обусловлена тем обстоятельством, что вызванное наличием потока трение в глушителе вызывает снижение добротности четвертьволновых резонаторов, а значит и уменьшение амплитуды резонансных пиков на графиках потерь передачи. Такая закономерность является типичной для всех резонаторных элементов в глушителях шума. Заметим, что здесь, как и в рассмотренной выше камере расширения, имеют место флуктуации потерь передачи на низких частотах. Причем, чем больше скорость потока, тем больше флуктуации, которые при скорости более 15 м/с становятся очень значительными.

Заключение

В настоящее время при использовании численных расчетов для определения акустических характеристик глушителей шума с наличием потока целесообразно моделировать процессы газодинамики с применением RANS модели, на основании проведенного анализа. Для простых элементов глушителей шума аналитические и численные методы имеют идентичные результаты, что дает возможность применять численные методы для расчета более сложной конфигурации глушителей шума. Также при численном моделировании в COMSOL Multiphysics на низких частотах получаемых характеристик наблюдается появляются некоторые флуктуации, которые

возрастают с увеличением скорости потока. Причина возникновения таких численных результатов требует более детального и подробного исследования с экспериментальным подтверждением, планируемого на следующих этапах исследования.

Список литературы

1. Alfredson R.J., Davies P.O.A.L. The radiation of sound from an engine exhaust // *Journal of Sound and Vibration*. 1970. V. 13, № 2. – P. 389–408.
2. Peat K.S. Evaluation of four-pole parameters for ducts with flow by the finite element method // *Journal of Sound and Vibration*. 1982. V. 84, № 3. P. 389-395.
3. Ih J.-G., Lee B.H. Analysis of higher-order mode effect in the circular expansion chamber with mean flow // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1985. – V. 77, № 4. – P. 1377–1388.
4. Munjal M.L., Prasad M.G. On plane-wave propagation in a uniform pipe in the presence of a mean flow and a temperature gradient // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1986. V. 80, N. 5. P. 1501-1506.
5. Munjal M.L., Doige A.G. On the relation between convective source characteristics and their acoustic counterparts // *Journal of Sound and Vibration*. 1990. V.36, N 2. P. 343-346.
6. Munjal M. L. Plane Wave Analysis of Side Inlet/Outlet Chamber Mufflers with Mean Flow // *Applied Acoustics*. 1997. V. 52, N. 2. P. 165- 175.
7. Singh N., Rabini P. Large eddy simulation of acoustic pulse propagation and turbulent flow interaction in expansion mufflers // *Applied Acoustics*. 2015. V. 96. N. 1. P. 6–19.
8. Zhu D.D., Ji Z.L. Transmission loss prediction of reactive silencers using 3-D time-domain CFD approach and plane wave decomposition technique // *Applied Acoustics*. 2016. V. 112. N. 1. P. 25–31.
9. Huang H., Ji Z. Acoustic attenuation analysis of circular dual-chamber mufflers with non-uniform flow // *Proceedings of INTERNOISE 2019*. Madrid, Spain, 16-19 June 2019. 7 p.
10. Lu Z., Pan W., Guan Y. Numerical studies of transmission loss performances of asymmetric Helmholtz resonators in the presence of a grazing flow // *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2019, V. 38. N. 2. P. 244–254.
11. Bejsenbaeva D., Komkin A., Mironov M., Moskolenko V. Acoustic impedance of orifices with grazing flow // *MATEC Web of Conferences: ASO-2020*. 2020. 320. 00015.
12. Карнаухова Л. С., Комкин А. И. Применение интегрального показателя акустической эффективности для оптимизации комбинированного глушителя шума для системы выпуска автомобиля // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. 2021. №4 (82). С. 21–28.
13. Shashurin A.E., Ivanov N.I., Vasilyev A.V., Elkin Y.I., Razakov Z.P. Contribution of non-isothermal jets to the processes of noise generation of energy machines when installing silences // *Akustika*. 2021, T.41. N 11. P. 30-32.
14. Komkin A., Bykov A., Karakaeva T. Impedance of an Orifice in Nonlinear Regimes with Grazing Flow. 2022 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM), 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/DVM55487.2022.9930900.
15. Алёшина М.А., Кравчун П.Н. Акустические свойства многомодовых камерных звукоизоляторов в каналах // *Noise Theory and Practice*. 2022. Т. 8 № 2. С. 7-23.
16. Васильев А.В., Иванов Н.И., Шашурин А.Е. Разработка и апробация глушителей шума энергетических установок // *Экология и промышленность России*. 2023. Т. 27. № 2. С. 10-14.

References

1. Alfredson R.J., Davies P.O.A.L. The radiation of sound from an engine exhaust // *Journal of Sound and Vibration*. 1970. V. 13, № 2. – P. 389-408.
2. Peat K.S. Evaluation of four-pole parameters for ducts with flow by the finite element method // *Journal of Sound and Vibration*. 1982. V. 84, № 3. P. 389-395.
3. Ih J.-G., Lee B.H. Analysis of higher-order mode effect in the circular expansion chamber with mean flow // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1985. – V. 77, № 4. – P. 1377–1388.
4. Munjal M.L., Prasad M.G. On plane-wave propagation in a uniform pipe in the presence of a mean flow and a temperature gradient // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1986. V. 80, N. 5. P. 1501-1506.
5. Munjal M.L., Doige A.G. On the relation between convective source characteristics and their acoustic counterparts // *Journal of Sound and Vibration*. 1990. V.36, N 2. P. 343-346.
6. Munjal M. L. Plane Wave Analysis of Side Inlet/Outlet Chamber Mufflers with Mean Flow // *Applied Acoustics*. 1997. V. 52, N. 2. P. 165- 175.
7. Singh N., Rabini P. Large eddy simulation of acoustic pulse propagation and turbulent flow interaction in expansion mufflers // *Applied Acoustics*. 2015. V. 96. N. 1. P. 6–19.
8. Zhu D.D., Ji Z.L. Transmission loss prediction of reactive silencers using 3-D time-domain CFD approach and plane wave decomposition technique // *Applied Acoustics*. 2016. V. 112. N. 1. P. 25–31.
9. Huang H., Ji Z. Acoustic attenuation analysis of circular dual-chamber mufflers with non-uniform flow // *Proceedings of INTERNOISE 2019*. Madrid, Spain, 16-19 June 2019. 7 p.
10. Lu Z., Pan W., Guan Y. Numerical studies of transmission loss performances of asymmetric Helmholtz resonators in the presence of a grazing flow // *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2019, V. 38. N. 2. P. 244–254.
11. Bejsenbaeva D., Komkin A., Mironov M., Moskolenko V. Acoustic impedance of orifices with grazing flow // *MATEC Web of Conferences: ASO-2020*. 2020. 320. 00015.
12. Karnauxova L.S., Komkin A.I. Application of an integral indicator of acoustic efficiency to optimize a combined noise muffler for a car exhaust system // *Issues of modern science and practice*. V. I. Vernadsky University. 2021, V.82. N. 4. P. 21–28.
13. Shashurin A.E., Ivanov N.I., Vasilyev A.V., Elkin Y.I., Razakov Z.P. Contribution of non-isothermal jets to the processes of noise generation of energy machines when installing silences // *Akustika*. 2021, T.41. N 11. P. 30-32.
14. Komkin A., Bykov A., Karakaeva T. Impedance of an Orifice in Nonlinear Regimes with Grazing Flow. 2022 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM), 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/DVM55487.2022.9930900.
15. Aljoshina M.A., Kravchun P.N. Acoustic properties of multimode expansion chamber sound insulators in ducts // *Noise Theory and Practice*. 2022, V. 8 N. 2. P. 7-23.
16. Vasiliev A.V., Ivanov N.I., Shashurin A.E. Development and testing of noise suppressors for power plants // *Ecology and industry of Russia*. 2023, V. 27. N. 2. P. 10-14.