

РАСЧЕТ ТРЕХКАМЕРНОГО ГЛУШИТЕЛЯ ШУМА

А.А. Аграфонова, А.И. Комкин

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: agrafonova_anna@mail.ru

В данной работе описано исследование особенностей работы реактивных глушителей шума в зависимости от конструктивного исполнения резонаторных элементов на примере трехкамерного глушителя. Для оценки акустической эффективности исследованных глушителей использовались потери передачи. Расчеты выполнены методом конечных элементов с использованием программных пакетов ANSYS и SYSNOISE. Помимо численных расчетов была проведена аналитическая оценка потерь передачи. Для этого были составлены соответствующие расчетные схемы, написаны уравнения и получены искомые величины. Оба метода показали хорошее совпадение результатов расчета. При этом каждый из подходов имеет свои как положительные, так и отрицательные стороны.

Ключевые слова: шум, уровень звукового давления, глушитель, потери передачи, метод конечных элементов, численное моделирование

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных путей снижения шума, распространяющегося в каналах, является использование глушителей шума. Наиболее распространены камерные глушители, которые состоят из одной или нескольких камер, представляющих собой расширения трубопровода по его сечению. Здесь звуковые волны, попадая в камеру, отражаются от ее противоположной стенки и, возвращаясь к входу в камеру в противофазе по отношению к прямой волне, уменьшают ее интенсивность. В глушителях наблюдается рассеивание звуковой энергии в местах изменения проходного сечения канала. Кроме того, отраженные от глушителя волны возвращаются по присоединительному патрубку к источнику шума и, отражаясь от него, движутся опять к глушителю. Этот процесс может повторяться несколько раз. При этом происходит диссипация акустической энергии вследствие трения и теплопроводности стенок системы шумоглушения. Помимо этого, почти в каждом глушителе присутствуют резонансные элементы в виде перфорации труб, по которым проходит поток. В качестве основной акустической характеристики глушителя используются так называемые потери передачи звуковой энергии (TL), представляющие собой десять логарифмов отношения звуковой мощности прямой волны, поступающей на вход глушителя, к звуковой мощности прямой волны на выходе из глушителя. Этот показатель сравнительно легко может быть измерен или определен расчетным путем. Поэтому эту характеристику целесообразно использовать в исследовательских целях для оценки эффективности той или иной конструкции глушителя, а также при сравнении теоретических и экспериментальных результатов с целью проверки правильности разрабатываемых расчетных схем [2, 3, 10].

Расчету и проектированию глушителей шума посвящено большое количество работ [1, 4, 5, 7, 8]. До недавнего времени конструкции глушителей выбирались опытным путем, либо с помощью аналитических расчетов простых конструкций. Применение конечно-элементного моделирования в расчетах позволило проводить оценку более сложных конструкций.

В данной работе исследовались акустические характеристики реактивного глушителя шума с перфорированными трубами и их зависимость от параметров перфорации.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГЛУШИТЕЛЯ ШУМА

Объем глушителя разделен на три камеры, две из которых работают как расширительные и одна – в качестве резонансной в зависимости от типа перфорации.

Все расчетные модели имели одинаковые геометрические параметры, такие как габаритные размеры и объемы резонансных камер. Отличие заключалось только в типе перфорации, а именно величине, количестве и расположении отверстий в трубах глушителя.

На рис. 1 представлена схема исследуемого трехкамерного глушителя с характерными размерами. Общий объем глушителя представляет собой цилиндр диаметром 180 мм и длиной 300 мм, разделенный перегородками на три камеры с длинами 80, 100 и 120 мм соответственно. Все трубы сдвинуты относительно центральной осевой линии на 45 мм и имеют диаметр 50 мм. Изначально поток попадает в третью камеру, из нее через две трубы в первую, а затем на выход из глушителя. Если во входной, выходной или переточной трубах имеется перфорация, то в работу вступает средняя камера.

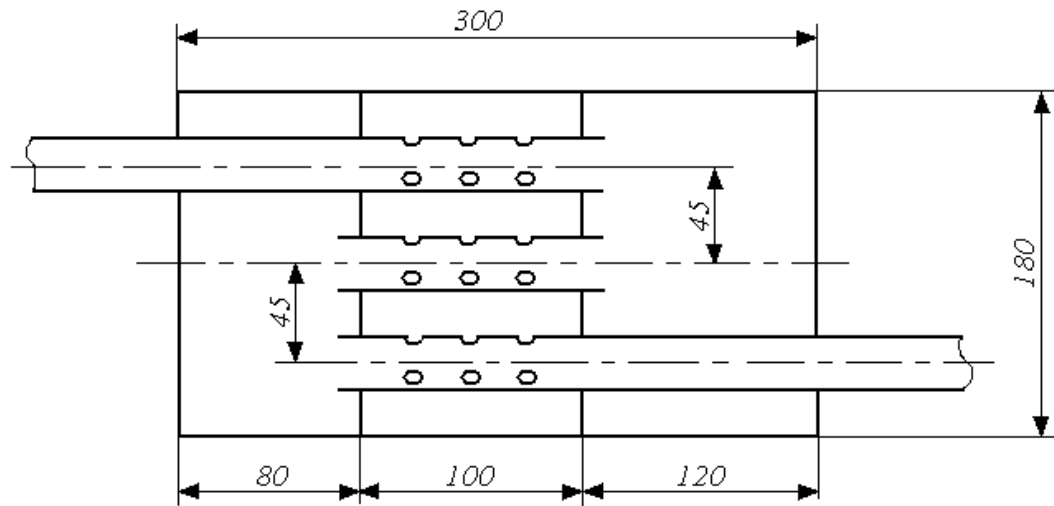


Рис. 1. Общий вид трехкамерного глушителя шума

При использовании численных методов анализируемые конфигурации глушителей были построены и разбиты на конечные элементы в программной среде ANSYS, а затем импортированы в среду SYSNOISE, где задавались граничные условия и проводился акустический расчет. Полученные значения звукового давления фиксировались в трех точках, затем проводилась оценка потерь передачи звуковой энергии данного вида глушителя по трехточечному методу [6, 9]. Численные расчеты проводились при задании на входе модели глушителя возмущающего воздействия в виде колебания поршня с единичной амплитудой. В выходном патрубке модели глушителя накладывалось граничное условие в виде безотражающего импеданса. Расчет акустических характеристик глушителя проводился в диапазоне от 10 до 1000 Гц с шагом 10 Гц.

Следует отметить, что несмотря на большие возможности численных расчетов, их использование создает ряд проблем, прежде всего с точки зрения трудоемкости вычислений. Сам процесс построения и разбиения на элементы в программе ANSYS занимает несколько минут. Затем нужно время на импортирование расчетной модели в программную среду SYSNOISE, что также занимает несколько минут в зависимости от количества элементов разбиения. Кроме того, сам процесс проведения вычислений занимает определенное время, которое при подробном разбиении модели может быть

очень значительным. Еще одна проблема использования численных расчетов связана с проверкой точности и достоверности получаемых результатов, которые в большей мере будут определяться степенью подробности разбиения рассматриваемой конфигурации глушителя на конечные элементы.

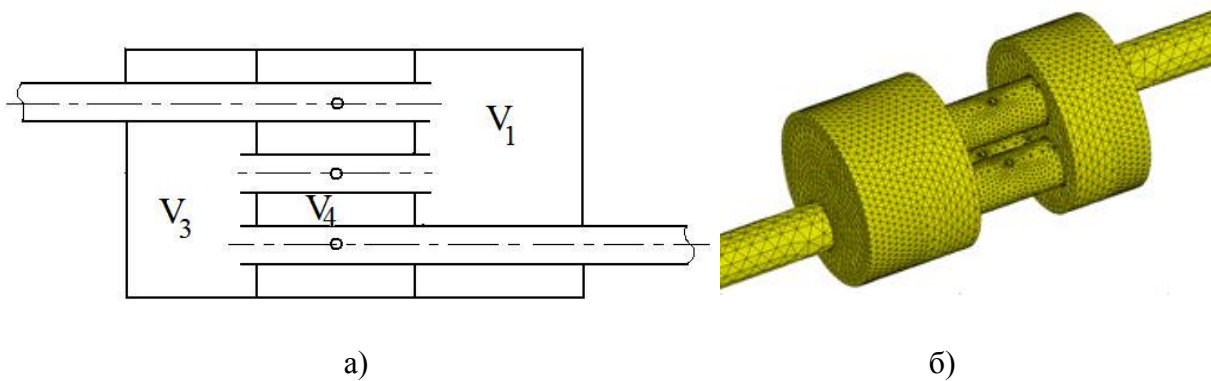


Рис. 2. Схема трехкамерного глушителя шума (а) и его конечно-элементная модель (б)

Для оценки численных расчетов наряду с конечно-элементным моделированием был рассмотрен способ аналитического расчета трехкамерного глушителя шума. Учитывая, что возможности аналитических методов ограничены, сравнение численных и аналитических методов расчета было выполнено для упрощенного варианта трехкамерного глушителя, в котором перфорация труб глушителя сведена только к одному отверстию, как показано на рис. 2, а. Соответствующая конечно-элементная модель такого глушителя представлена на рис. 2, б, где для лучшего представления расположения отверстий в трубах объем средней камеры на данном рисунке не показан.

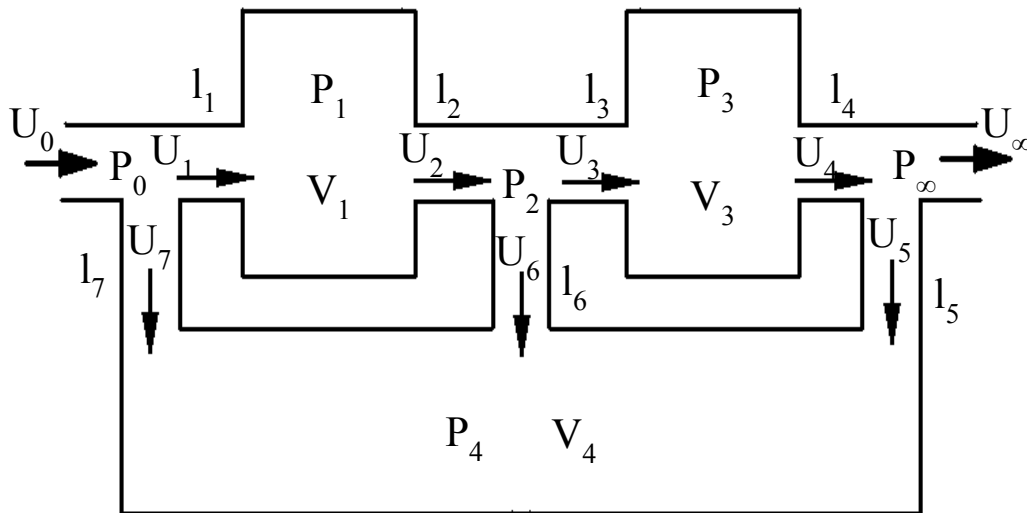


Рис. 3. Схематическая модель для аналитического расчета трехкамерного глушителя

Расчетная схема для аналитического расчета трехкамерного глушителя представлена на рис. 3. В разработанной аналитической модели предполагалось, что каждый из объемов трехкамерного глушителя может быть представлен в виде сосредоточенного элемента, характеризуемого только объемом V . При этом геометрические размеры объемов и их форма не принимаются во внимание. Это

предположение справедливо, когда длины волн в рассматриваемом частотном диапазоне много больше характерных геометрических размеров камер.

В соответствии с этой схемой можно составить несколько уравнений, описывающих происходящие в каналах и камерах процессы:

1) Уравнения движения в патрубках:

$$i\omega U_1 \rho l_1 = P_0 - P_1;$$

$$i\omega U_2 \rho l_2 = P_1 - P_2;$$

$$i\omega U_3 \rho l_3 = P_2 - P_3;$$

$$i\omega U_4 \rho l_4 = P_3 - P_\infty;$$

$$i\omega U_5 \rho l_5 = P_\infty - P_4;$$

$$i\omega U_6 \rho l_6 = P_2 - P_4;$$

$$i\omega U_7 \rho l_7 = P_0 - P_4.$$

2) Уравнения для объемов камер:

$$P_1 = (U_1 S_1 - U_2 S_2) \frac{\rho c^2}{j\omega V_1};$$

$$P_3 = (U_3 S_3 - U_4 S_4) \frac{\rho c^2}{j\omega V_3};$$

$$P_4 = (U_5 S_5 + U_6 S_6 + U_7 S_7) \frac{\rho c^2}{j\omega V_4}.$$

3) Уравнения распределения в тройниках:

$$U_0 S_0 = U_1 S_1 + U_7 S_7;$$

$$U_2 S_2 = U_3 S_3 + U_6 S_6;$$

$$U_4 S_4 = U_\infty S_\infty + U_5 S_5.$$

Решение этих уравнений позволяет найти величины, необходимые для составления матрицы для определения потерь передачи энергии в рассматриваемом глушителе.

Проведем сравнение расчета потерь передачи звуковой энергии, полученных двумя различными способами, рассмотренными в предыдущих разделах: аналитическим расчетом и численным при помощи моделирования. Потери передачи, полученные численным расчетом, оценивались по трехточечному методу.

Таблица 1. Сравнение потерь передачи различных исполнений глушителя

Модель	Описание	Потери передачи
M1	Во всех трех трубах по одному отверстию диаметром 7 мм	
M2	Во всех трех трубах по одному отверстию диаметром 5 мм	
M3	В верхней и средней трубах по одному отверстию диаметром 7 мм	
M4	В средней и нижней трубах по одному отверстию диаметром 7 мм	

— аналитический расчет; ---- численный расчет

В табл. 1 представлены результаты оценки потерь передачи звуковой энергии двумя методами в четырех типах трехкамерных глушителей, отличающимися расположением, величиной и количеством перфорационных отверстий. По графикам видно, что на низких частотах расчеты двумя различными способами показывают очень хорошее совпадение, а на высоких расходятся. Это объясняется тем, что аналитический расчет действителен в области низких частот, на высоких работает плохо. Но так как наибольшую проблему при проектировании глушителей составляют именно низкие частоты, а именно их аналитически оценить можно, то данный метод вполне работоспособен.

Кривые потерь, рассчитанные разными способами, показывают хорошее совпадение, несмотря на то, что каждый метод в себе включает некоторые особенности погрешности расчета. Так в численном расчете результат будет тем точнее, чем на большее количество элементов будет разбита расчетная модель. В данном случае число элементов достигало 230-250 тысяч, причем разбиение было равномерное. К тому же расчет проводился от 10 Гц до 1000 Гц с довольно крупным шагом 10 Гц, поэтому резонансные пики, если находились между двумя расчетными значениями, как правило, оказывались срезанными, что в какой-то степени объясняет отличие в пиках на низких частотах.

2. ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ТРЕХКАМЕРНОГО ГЛУШИТЕЛЯ С РАЗЛИЧНЫМ ИСПОЛНЕНИЕ ПЕРФОРАЦИИ

Дальнейшее исследование было посвящено выявлению особенностей исполнения перфорации в трубах глушителя. Рассмотренные варианты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Описание исследуемых моделей глушителя с различной перфорацией

Модель	Описание перфорации
T1	9 отверстий в верхней трубе диаметром 7 мм
T2	9 отверстий в нижней трубе диаметром 7 мм
T3	В двух средних трубах по 9 отверстий диаметром 7 мм
T4	Перфорированы все 4 трубы, 36 отверстий диаметром 7 мм
T5	Перфорированы верхняя и обе средние трубы, по 9 отверстий диаметром 7 мм
T6	Перфорированы верхняя и нижняя трубы, диаметр отверстий 7 мм
T7	Перфорированы верхняя и одна средняя трубы, диаметр отверстий 7 мм
T8	В верхней трубе 9 отверстий диаметром 7 мм, в нижней – 6 отверстий диаметром 7 мм
T9	В верхней трубе 9 отверстий диаметром 7 мм, в нижней – 3 отверстия диаметром 7 мм

Для начала был рассмотрен вопрос работы средней резонансной камеры при наличии перфорации в трубе одного вида. При сравнении первых двух моделей, имеющих одинаковую перфорацию, отличающуюся только положением во входной и выходной трубах, видно, что характерные для них кривые потерь передачи звуковой энергии очень похожи. На низких частотах наблюдаются две области небольшого плавного снижения шума, а затем резонансный пик с выходом на более-менее постоянное значение снижения. Отличие в резонансных частотах у этих двух моделей незначительно. Результаты сравнения особенностей работы перфорации при наличии ее в одной из труб или во всех четырех представлены на рис.4

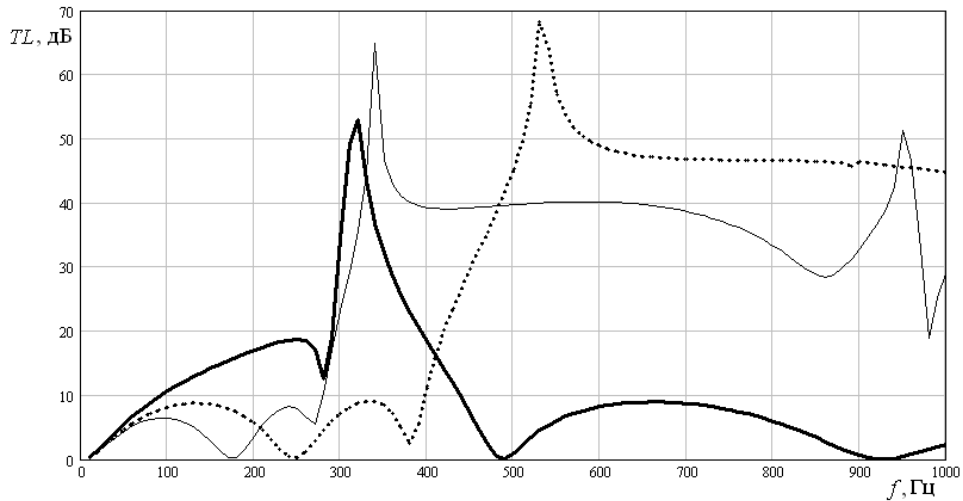


Рис. 4. Потери передачи моделей: — T1; ····· T3; — T4

Далее был поставлен вопрос рассмотрения оказываемого снижения шума при взаимной работе перфорации в каких-либо двух типах труб или во всех сразу.

В модели T4 во всех четырех трубах имеется одинаковая перфорация, как представлено на рис. 1 и наглядно показано на рис. 5 в виде пространственной 3D-модели такого типа глушителя, построенной в программе ANSYS.

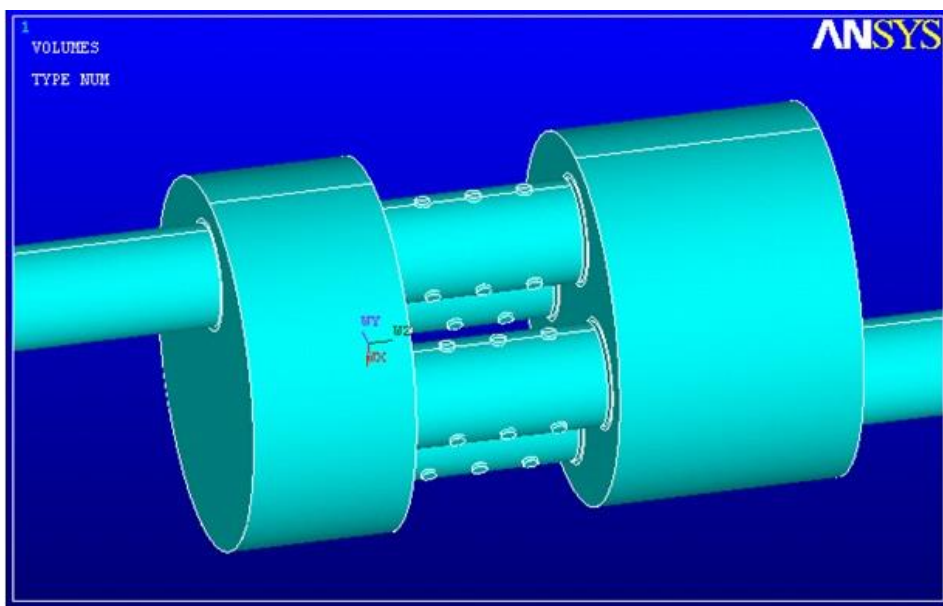


Рис. 5. Модель T4

По характеристике на рис. 4 хорошо видно, что такая комбинация перфорации всех труб по сравнению со случаями перфорирования отдельных труб увеличивает потери передачи в диапазоне частот примерно до 450 Гц, затем эффективность резко падает и оказывается намного хуже, чем у первых двух.

Для исследования данной ситуации был проведен расчет моделей с комбинированной перфорацией определенных труб. Так в модели T5 перфорация впускной трубы сочеталась с перфорацией двух средних труб, в модели T6 – с перфорацией в нижней трубе, а в модели T7 – с перфорацией только в одной средней трубе. Полученные данные представлены на рис. 6.

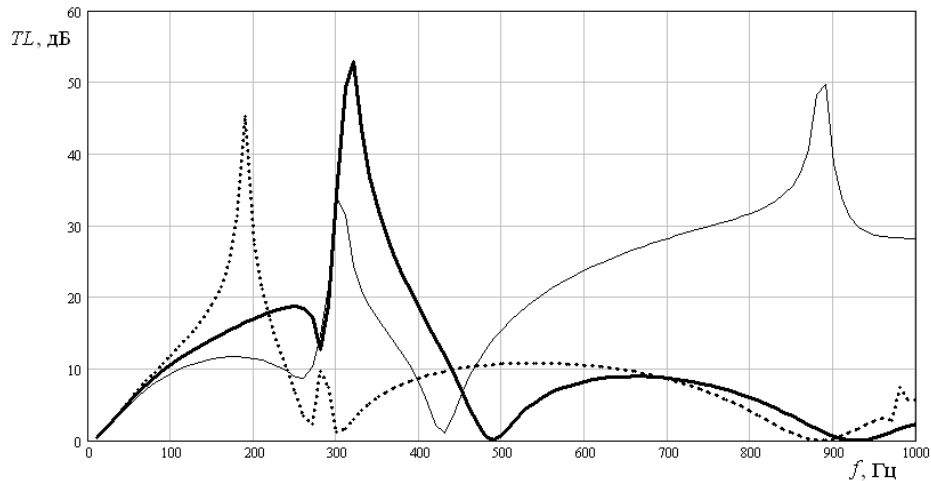


Рис. 6. Потери передачи моделей: — T5; ····· T6; — T4

При перфорации только в верхней и нижней трубах наблюдается картина снижения, аналогичная модели T4: так же резонансный пик сдвинут в низкочастотную область, а на средних и высоких частотах снижение звукового давления незначительное. Отличия в амплитудных и частотных значениях объясняются различием площади перфорации труб моделей 4 и 6 в два раза.

Интересная ситуация наблюдается при сочетании перфорации верхней и одной или двух средних переточных труб, что представлено моделями T5 и T7. Для потерь передачи звуковой энергии обеих этих моделей характерен пик резонансного снижения на частоте примерно 300 Гц, а затем плавное увеличение в области средних и высоких частот работы глушителя. Отличие опять-таки объясняется изменением площади перфорации в полтора раза.

По характеристикам на рис. 6 видно, что если «закрыть» перфорацию в нижней трубе, то резонансный пик смещается немного, но происходит увеличение потерь передачи энергии на частотах выше 500 Гц. Удаление перфорации в средних переточных трубах, наоборот, сдвигает резонансный пик в более низкочастотную область, но при этом совсем не меняет вид характеристики на других частотах.

Таким образом, видно, что изменяя площадь перфорации, мы можем сдвигать резонансный пик в низкочастотную область, которая в большинстве случаев и оказывается труднодостижимой. А также можем регулировать снижение уровня звукового давления на средних и высоких частотах. Так, например, видно, что при перфорировании верхней и нижней трубы эффективность работы глушителя на этих частотах резко снижается. Поэтому лучше оставлять какую-либо трубу сплошной. А вот изменением перфорации в переточной трубе можно добиться корректирования спектра снижения звука, а, следовательно, и повышения эффективности работы глушителя.

Следующим шагом в исследовании стало изучение влияния совместной перфорации во входной и выходной трубах. Выше была рассмотрена модель Т6 с совместной одинаковой перфорацией этих труб. Теперь же попробуем изменить площадь перфорации одной из них, как показано в расчетных моделях Т8 и Т9.

По спектрам потерь передачи звуковой энергии этих моделей по сравнению с моделью Т6 видно, что характерный вид кривой не изменяется. С уменьшением площади перфорации нижней трубы отличие проявляется в некотором увеличении частоты резонансного пика, а также в увеличении амплитудного значения снижения звука в области средних и высоких частот. В предельном случае, т.е. когда в нижней трубе площадь перфорации будет сведена к нулю, мы придем к модели Т1, у которой частота резонансного пика еще немного выше по сравнению с этими моделями, а амплитудное значение в области высоких частот больше.

Таким образом, мы видим, что вид кривой потерь передачи звуковой энергии существенным образом зависит от такого параметра конструкции, как перфорация, а именно от количества, величины и расположения в различных трубах отверстий.

Модели с перфорированной только одной трубой или двумя средними переточными создают после резонансного пика широкую и довольно высокую полосу снижения звукового давления. Но такие типы глушителей не работают на низких частотах. Для этого надо уменьшать количество и диаметр отверстий.

Модели с перфорацией во впускной и выпускной трубах проявляют резонансное снижение в низкочастотной области, но вместе с тем резко снижаются потери передачи на средних и высоких частотах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, можно сказать, что оба метода дают хорошее совпадение результатов расчета. При этом каждый из подходов имеет свои как положительные, так и отрицательные стороны.

Численный способ расчета очень долгий, но зато позволяет определять множество различных параметров в любой области или точке расчетной модели. В том числе предоставляется возможность наглядного представления, например, складывающейся картины распределения давления или скорости в различных направлениях в любом сечении модели. Расчет многокомпонентной модели позволяет оценить взаимодействие различных компонентов при их совместной работе. Трехмерное моделирование позволяет создавать довольно сложные модели, описание которых аналитически проблематично.

Аналитический метод расчета проявляет такую же точность, при этом требуя гораздо меньше временных затрат. К тому же позволяет довольно быстро корректировать спектр снижения уровня звукового давления при внесении изменений в какой-либо заданный параметр. Сложность тут возникает в аналитическом описании сложных моделей, а также в предварительной оценке приведенной длины отверстий.

Для сокращения времени расчета при исследовании на низких частотах можно пользоваться аналитическим методом, а для более высоких частот и сложных конструкций требуется численный метод;

Для получения определенных характеристик снижения шума можно руководствоваться следующими принципами:

При наличии перфорации в верхней и нижней трубах достигается низкочастотный пик потерь передач, но на средних и высоких частотах снижение шума очень небольшое;

Наличие перфорации в верхней и средних или в нижней и средних трубах способствует созданию широкой области снижения шума на средних и высоких частотах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шапиро Б.К. Основы расчета глушителей выхлопа. – М.: Оборонгиз, 1943. – 64 с.
2. Davis D.D., Stokes G.M., Moor D., Stevens G.L. Theoretical and experimental investigation of mufflers with comments on engine exhaust muffler design // NASA. Report, № 1192. – 1954. – 48 p.
3. Салливан Дж.У. Моделирование шума выхлопной системы двигателя // Аэродинамический шум в технике: Пер. с англ.– М.: Мир, 1983.– С. 233– 256.
4. Munjal M.L. Acoustics of ducts and Mufflers. – New York: Wiley- Interscience, 1987. – 328 p.
5. Старобинский Р.Н. Глушители шума // Техническая акустика транспортных машин: Справочник. – СПб.: Политехника, 1992. – С. 200–265.
6. Gerges S.N.Y., Jordan R., Thieme F.A., Bento Coelho J.L. Muffler modeling by transfer matrix method and experimental verification // Journal of the Brazilian mechanical sciences and engineers. –2005. – V. 27, № 2. – P. 132–140.
7. Ji Z.L. Acoustic attenuation performance analysis of multi-chamber reactive silencers // Journal of Sound and Vibration. – 2005. – V. 283, № 1-2. – P. 459–466.
8. Bilawchuk S., Fyfe K.R. Comparison and implementation of the various numerical methods used for calculating transmission loss in silencer systems // Applied Acoustics, 2003. — V. 64, — № 9. — PP. 903–916.
9. Комкин А.И., Аграфонова А.А. Исследование излучения шума выпуска автомобиля методом конечных элементов // Безопасность в техносфере. – 2010. – №5. – стр. 17-22.
10. Комкин А. И., Аграфонова А. А., Юдин С. И. Оценка акустической эффективности автомобильных глушителей шума // Безопасность в техносфере. - 2012. - № 3. - стр. 61-65.