

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА В ГАЗОВОДАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С УЧЕТОМ ИСТОЧНИКОВ АКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ЗВУКА

Васильев А.В.

Самарский государственный
технический университет
ул. Молодогвардейская, 244
г. Самара, Российская Федерация,
443100
avassil62@mail.ru

Данная статья посвящена проблемам моделирования и расчета распространения низкочастотного звука в газопроводах энергетических установок с учетом источников активной компенсации звука. Описана структура разработанного программного обеспечения для прогнозирования и расчета распространения низкочастотного звука в газопроводах. Программное обеспечение использует метод четырехполосников и учитывает излучение от дополнительного (активного) источника. С использованием программного обеспечения можно оценить параметры источника звука для обеспечения эффективного снижения звука. Приведены примеры использования разработанного программного обеспечения для расчета шума впуска и выпуска двигателя внутреннего сгорания. Результаты расчетов показывают, возможность использования программного обеспечения, основанного на методе четырехполосников, для акустической оценки параметров газопроводов и глушителей шума для различных областей применения.

Ключевые слова: *низкочастотный звук, газопровод, энергетическая установка, моделирование, расчет, программное обеспечение*

1 Введение

Наличие и постепенное расширение автотранспортного парка в крупных зарубежных и российских городах вызывает уплотнение транспортных потоков. Это вызывает увеличение интенсивности акустического воздействия на прилегающие к автодорогам селитебные территории. Наблюдается следующая тенденция: при снижении за последние два десятилетия шума автомобилей на 8-10 дБА, уровень шума в городах продолжает ежегодно возрастать в среднем на 0,5-1,0 дБА. Основной причиной этого является увеличение числа эксплуатируемых автомобилей [2, 7, 8]. Проведённые в Московском автомобильно-дорожном институте исследования [8] показывают, что в общую звуковую мощность транспортного шума на улицах Москвы значительный вклад вносят легковые автомобили.

Доля каждого из источников шума автомобиля в общем шуме зависит от

широкого ряда факторов (таких, как тип автомобиля, применяемые шумозащитные средства, режим движения, тип дорожного покрытия, марка шины и пр.).

Снижение шума автомобиля является комплексным мероприятием. Для снижения шума двигателя применяют материалы с повышенными вибродемпфирующими свойствами, используют виброизолирующие прокладки в местах установки поддона. Уменьшение шума вентилятора достигается за счёт уменьшения числа лопастей, применения неметаллических материалов, снижения частоты вращения.

Шум шин зависит от качества дорожного покрытия, типа шины, погодных условий и др. [5].

Шум выпуска является наиболее интенсивным среди других источников шума автомобиля (незаглушенный шум выхлопа достигает 120-130 дБА), автомобиль оборудуется штатным глушителем шума выпуска, от качества которого в большой степени зависит и

общий шум. В ряде случаев (преимущественно для отечественных автомобилей) вторым по значимости становится шум впуска, обусловленный в основном пульсацией давления, возникающих в результате открытия и закрытия впускного клапана [1, 2, 7, 8].

В отличие от высоко- и среднечастотного шума, снижение которого достаточно эффективно осуществляется традиционными средствами: пассивными (реактивными, диссипативными) глушителями и звукоизоляцией, для уменьшения низкочастотного шума гораздо эффективнее применять методы активной компенсации.

Численные методы (метод конечных элементов, метод граничных элементов, их комбинация) по сравнению с аналитическими методами, несомненно, обладают более широкими возможностями. Однако такое моделирование и программное обеспечение довольно дорогостоящее. В связи с этим оно используется в системах, где преобладает трёхмерное представление объекта моделирования. Передача и излучение шума в газовадах систем энергетических установок в низкочастотном диапазоне и параметры глушителей шума могут быть эффективно описаны с помощью аналитической одномерной модели, основанной на методе электроакустических аналогий [3, 9].

Данная работа посвящена проблемам моделирования и расчета распространения низкочастотного звука в газовадах энергетических установок с учетом источников активной компенсации звука. Разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее рассчитывать распространение низкочастотного звука в газовадах энергетических систем и оценивать эффективность его снижения с учетом источника активной компенсации звука.

2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Так как система газовадов представляет собой набор акустических устройств,

выполненных в виде труб с различными сочленениями: расширениями, камерами, отводными каналами и т. п., а область применения активных систем компенсации ограничивается низкочастотным диапазоном (20-300 Гц), используем для моделирования хорошо известный метод электроакустических аналогий. Весь звукопровод разбивается на отрезки волноводов. Так как неоднородности звукопровода меньше длины волны, их можно рассматривать как элементы с сосредоточенными параметрами.

При этом делаются следующие допущения:

1. При движении газового потока по волноводу возмущения давления p и плотности ρ малы по сравнению с величинами для внешней среды p_0 и ρ_0 ;
2. Пренебрегаем небольшими колеблющимися величинами при описании формы одномерных колебаний акустического давления (т. е. волновое уравнение является линейным);
3. Операторы дифференцирования в волновом уравнении являются «линейными».

Отрезки труб, сужения, расширения, заслонки, щели и другие части звукопроводов в приближенной теории являются акустическими элементами. Каждый элемент при этом соответствует пассивному четырехполюснику в терминологии электроакустических аналогий, который может быть представлен в виде передаточной матрицы размерностью 2×2 . В данном контексте действуют следующие аналогии (таблица 1).

Таблица 1. Электроакустические аналогии

P	акустическое давление	\Rightarrow	U	электрическое напряжение
\dot{X}	объемная скорость	\Rightarrow	i	электрический ток
z_a	акустический импеданс	\Rightarrow	z	электрический импеданс

Параллельно с электроакустической моделью, расчёт которой осуществляется в частотной области, в программе реализована дискретно-временная модель. Её назначение – моделирование цифровой системы управления, формирование различного рода сигналов, а также предоставления таких инструментов визуализации рассчитанных результатов, как осциллограф, анализатор спектра и т. п. Дискретно-временная модель строится на основе «дискретных цифровых элементов». Такой элемент имеет некоторое количество вход i и некоторое количество выходов o . На входы подаются сигналы (вещественные числа), согласно реализуемой элементом функции осуществляется вычисление выходных сигналов. Некоторые элементы, например такие, как «осциллограф» ($i=1, o=0$) только считывают информацию со входов и отображают её в своей экранной форме. Другие же, например «генератор гармонических сигналов» ($i=0, o=1$) лишь формируют сигналы на своём выходе. Более сложные элементы, подобные модели

контроллера осуществляют расчёт выходных сигналов по собственной подпрограмме.

На рисунке 1 представлена иерархическая схема применяемых в программе элементов.

Акустические элементы в программе делятся на три типа:

1. «Источник» – имитация реальных источников звука (громкоговоритель, ДВС); моделируется набором гармоник (частота, амплитуда, фаза).

2. «Проводник» – имитирует различные части звукопровода; моделируется матрицей передачи.

3. «Излучатель» – описывает передачу акустической мощности из газовада в окружающую среду и отражение от открытого конца трубы.

Каждый акустический элемент характеризуется следующими свойствами:

- Количество присоединений, n ;
- Математическое описание;
- Геометрическая форма и размер сечений волновода в местах стыковки.

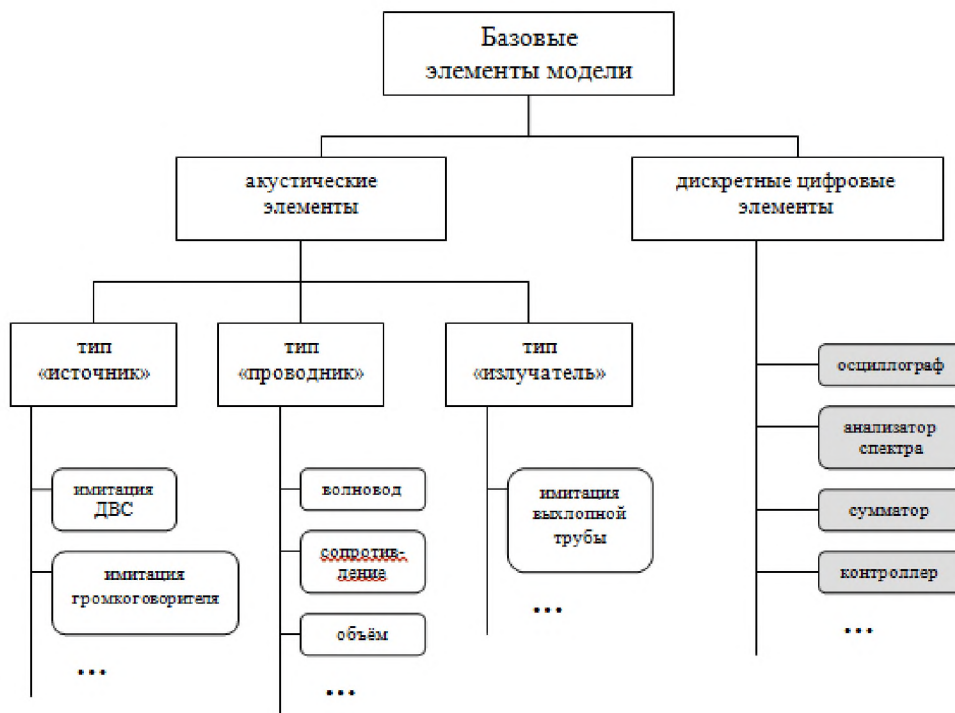


Рисунок 1. Иерархия элементов модели

2.1. Количество соединений, n

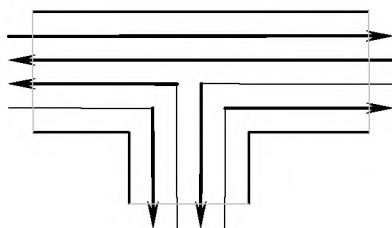
Определяет количество возможных соединений с другими акустическими элементами. Например, для трубы-волновода $n = 2$, для тройника $n = 3$, для излучателя или источника $n = 1$.

2.2. Математическое описание

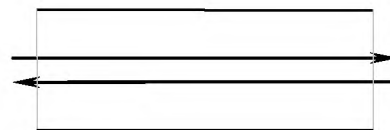
В программном коде для каждого акустического элемента описываются выражения для каждого элемента матрицы передачи (пассивный четырехполюсник в терминологии электроакустических аналогий):

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \quad (1)$$

в виде:



а)



б)

Рисунок 2. Возможные направления прохождения звуковой волны

2.3. Геометрическая форма и размер сечений волновода в местах стыковки

Каждое присоединение описывается геометрическими размерами его сечения. Построение модели звукопровода осуществляется путём его сборки из отдельных акустических элементов. Каждый элемент может стыковаться с другим элементом, обладающим входом с таким же сечением.

В дополнение к этому элемент типа «источник» содержит список (массив) мод, каждая из которых характеризуется

$$\begin{aligned} A &= a(\omega, \dots), \\ B &= b(\omega, \dots), \\ C &= c(\omega, \dots), \\ D &= d(\omega, \dots), \end{aligned} \quad (2)$$

где ω – частота звуковой волны.

Т. е. все элементы матрицы представляются как функции от частоты и некоторых других параметров, индивидуальных для каждого акустического элемента (геометрические характеристики, например, для трубы площадь сечения и длина).

При этом подобные матрицы передачи акустического элемента составляются для всех направлений, т. е. всех возможных вариантов пар «вход-выход». Таким образом, для трубы будет определено две матрицы, для тройника – шесть. На рисунке 2 каждая линия изображает одно из возможных направлений передачи.

следующими величинами: частота, амплитуда, фаза.

В общем случае источник является многомодовым, однако в простейших случаях представляется одной гармоникой. Для упрощения хранения набора гармоник и упрощения обработки посредством дискретного преобразования Фурье список мод представим в виде массива комплексных чисел, действительная часть которых определяет амплитуду, мнимая – фазу, а порядковый номер в массиве – соответствующую ему частоту.

Сочленение временной и частотной моделей происходит путём введения

специальных элементов обладающих входами/выходами обоих типов. Основные из них:

1. «Одномодовый громкоговоритель». На входе: сигналы, задающие амплитуду волны A , частоту ω , фазу ϕ . На выходе: гармоника с соответствующими характеристиками:

$$P = A \cdot e^{j(\omega t + \phi)}$$

$$\dot{X} = P / Z_a \quad , \quad (3)$$

2. «Многомодовый громкоговоритель». На входе: сигнал задающий амплитуду волны $A(t)$. На выходе: N гармоник, пересчитанных быстрым преобразованием Фурье (FFT) по выборке из $A(t)$.

3. «Излучатель с микрофоном». На входе: присоединение к волноводу. На

выходе: рассчитанная по всем модам от всех источников $P\Sigma(t)$.

3 ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Интерфейс программы построен по идеологии, схожей с модулем Simulink™ пакета MATLAB™. Добавление элементов осуществляется перетаскиванием их мышью из панели элементов на рабочее пространство. Перемещение элементов в рабочем пространстве и создание между ними связей также производится при помощи мыши. Двойным щелчком по элементу вызывается индивидуальная оконная форма данного элемента. Она отображает визуальную информацию по элементу и позволяет редактировать его параметры.

Пользовательский интерфейс программы продемонстрирован на рисунке 3.

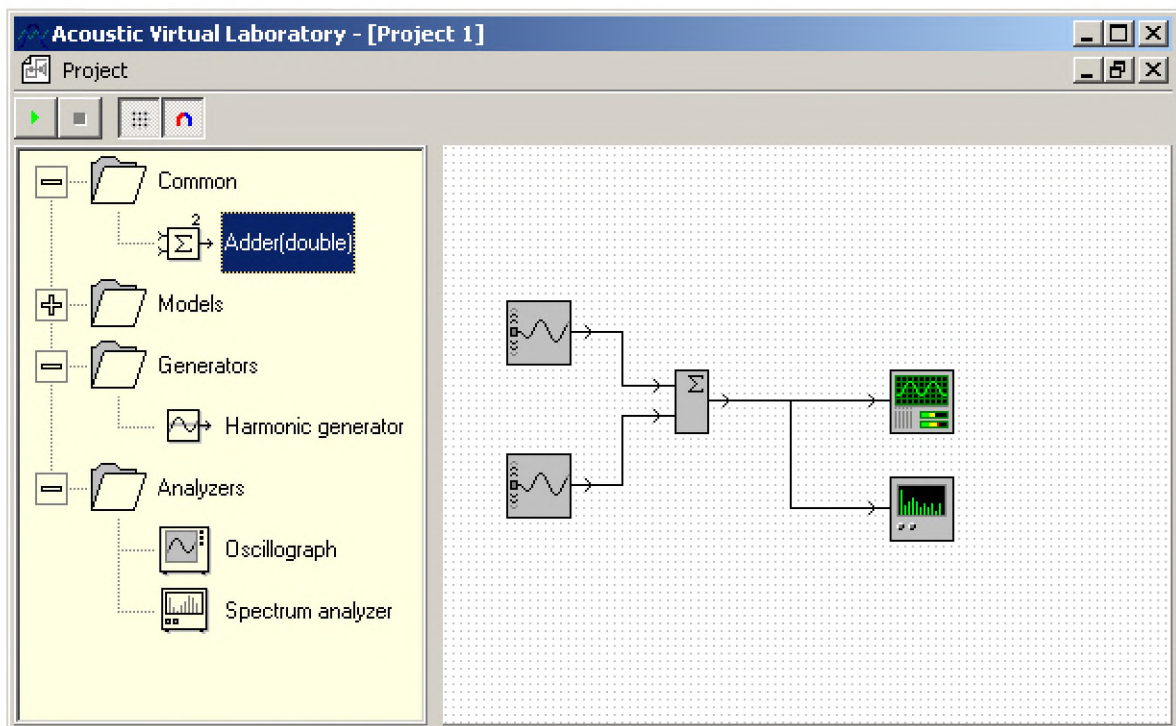


Рисунок 3. Пользовательский интерфейс программного обеспечения

Запуск модели (кнопка «старт» [▶]) инициирует расчёт модели на заданном интервале времени.

4 ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Расчёт модели осуществляется на заданном интервале времени с выбранной частотой дискретизации по времени (намного меньшей периода исследуемых частот), согласно следующим принципам.

Для «дискретных цифровых элементов» каждый квант времени осуществляется пересчёт выходных сигналов по состоянию входных согласно реализуемой элементом функции.

Для акустических элементов:

1. Для каждого источника согласно теории графов определяется путь (цепочка элементов) от источника до излучателя.

2. Для каждой моды каждого из источников согласно определённому пути вычисляется матрица передачи, равная произведению всех матриц передачи в цепочке.

$$A_{\Sigma V} = \prod_{j=1}^k A_j = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \times \dots \times \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{bmatrix}, \quad (4)$$

Здесь k – количество звеньев (элементов) в цепочке.

3. Для каждого излучателя согласно принципу суперпозиции для каждого кванта времени вычисляются энергия излучения, уровень звуковой мощности и величина давления $p(t)$.

Для повторного использования построенной модели предусмотрено её сохранение в специальный файл проекта, а также загрузка из него. Принимая во внимание неоднородность хранимых данных, их строгую иерархию и способы работы с ними, в качестве формата хранения данных модели выбран XML. EXtensible Markup Language (расширяемый язык разметки), или XML как его принято называть, является одним из языков разметки документов, созданным для того, чтобы можно было воспользоваться языком SGML (Standard Generalized Markup Language – стандартный язык общей разметки) в среде World Wide Web. В

отличие от HTML, который определяет фиксированный или статистический класс документов, XML позволяет определять собственные пользовательские классы документов.

Кроме этого, существует достаточно много средств автоматизации разработки программного кода для работы с данным форматом, он достаточно распространён и хорошо стандартизован.

Схема сохранения данных построена по принципу контейнеров – в каждом элементе реализуются собственные функции чтения и записи индивидуальных данных в XML объект.

Кодирование производилось на языке высокого уровня C++ с помощью визуальной среды разработки Borland C++ Builder 6.

Реализация элементов модели в программном обеспечении выполнена следующим образом. Все элементы модели являются наследниками абстрактного класса TVLObject. Код же каждого элемента находится в отдельном файле – подключаемой библиотеке DLL (dynamic-link library). Благодаря этому программа становится гибко перенастраиваемой и закладывает фундамент для дальнейшего развития. Добавление новых элементов модели в программу становится возможным путём копирования в её папку новых библиотек (dll-файлов).

Другим преимуществом такой реализации является то, что исчезает привязка к конкретной среде разработки. Используя описанный стандарт на интерфейс элемента модели (посредством абстрактного класса TVLObject) пользователь, обладающий навыками программирования, может самостоятельно добавить в программу собственные элементы. Для облегчения процесса разработки собственных элементов в среде Borland C++ Builder сформирован шаблон проекта DLL.

В качестве примера реализации разработанного программного обеспечения рассмотрим акустический расчет систем

впуска и выпуска автомобильного двигателя внутреннего сгорания.

Программное обеспечение позволяет оценивать вносимые потери при установке глушителя шума, уровень звука, излучаемого открытыми срезами воздухозаборного патрубка и выпускного патрубка и др. Упрощенная расчетная схема при оценке излучения звука открытым излучающим срезом патрубка системы газообмена ДВС при наличии

компенсирующего источника показана на рисунке 4. Были сделаны расчеты передаточной характеристики при распространении звука в системах впуска и выпуска ДВС при различных компоновках источника активной компенсации звука. Пример расчета показан на рисунке 5. Получена достаточная сходимость расчетных показателей с экспериментальными.

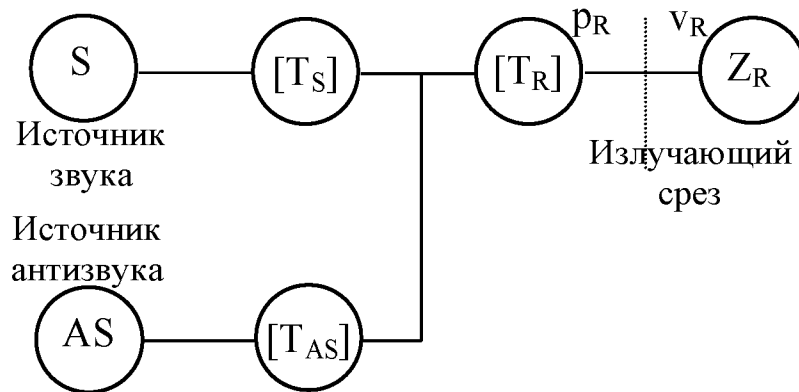


Рисунок 4. Упрощенная расчетная схема при оценке излучения звука открытым излучающим срезом патрубка системы газообмена ДВС при наличии компенсирующего источника

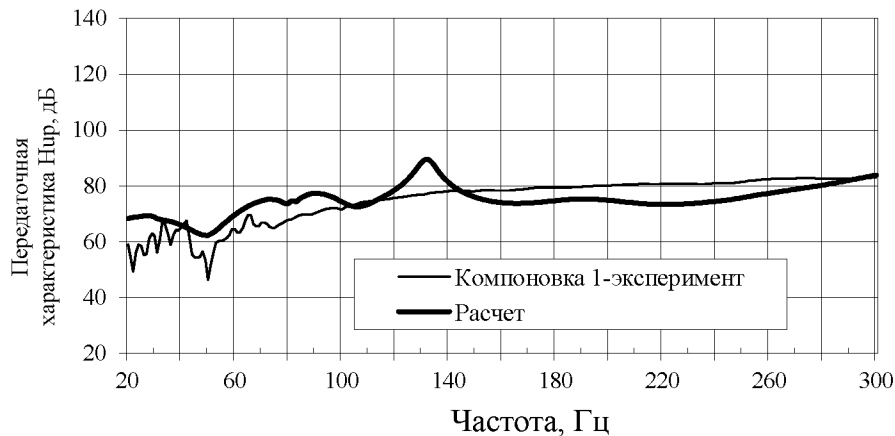


Рисунок 5. Пример расчета передаточной характеристики при распространении звука в системах впуска и выпуска ДВС при компоновке источника активной компенсации звука №1

4 Выводы

Описана структура разработанного программного обеспечения для прогнозирования и расчета распространения низкочастотного звука в газовадах. Программное обеспечение использует метод четырехполосников и учитывает излучение от дополнительного (активного) источника. С использованием программного обеспечения можно оценить параметры источника звука для обеспечения эффективного снижения звука. Приведены примеры использования разработанного программного обеспечения для расчета шума впуска и выпуска двигателя внутреннего сгорания. Результаты расчетов показывают возможность использования программного обеспечения, основанного на методе четырехполосников, для акустической оценки параметров газовадов и глушителей шума для различных областей применения.

5 Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 20-19-00222).

Список использованных источников

- [1] Васильев А. В. Снижение низкочастотного шума и вибрации в газовадах энергетических установок с использованием метода активной компенсации СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. - 294 с.
- [2] Васильев А. В. Акустическое моделирование и комплексное снижение шума автомобильных двигателей внутреннего сгорания: Монография Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2004. - 296 с.
- [3] Васильев А.В. Моделирование и снижение низкочастотного шума и вибрации энергетических установок и присоединенных механических систем. Монография. - Самара, изд-во Самарского научного центра РАН, 2011. 12,5 п.л., 216 с.
- [4] Васильев А.В. Об опыте исследования и снижения вибрации компрессорных установок. В научном журнале "Noise Theory and Practice", 2016 г., Т.2, №2, с. 27-34.
- [5] Васильев А.В., Комлик Е.А. Методика расчета и экспериментальное исследование шума системы "шины автотранспортного средства – дорожное покрытие". В научном издании «Известия Самарского научного центра РАН», г. Самара, 2012 г., т. 14, №1(3), с. 849-851.
- [6] Владиславлев А.С. и др. Трубопроводы поршневых компрессорных машин. - М.: Машиностроение, 1972. - 288 с.
- [7] Иванов Н.И., Никифоров А.С. Основы виброакустики: Учебник для вузов - СПб.: Политехника, 2000. – 482 с.
- [8] Луканин В.Н., Гудцов В.Н., Бочаров Н.Ф. Снижение шума автомобиля. М, Машиностроение, 1981, 158 с.
- [9] Муньял М.Л. Акустика волноводов и глушителей. Нью-Йорк, Вилей Интерсайнс, 1987.

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR ESTIMATION OF LOW FREQUENCY SOUND PROPAGATION IN GAS GUIDES OF POWER PLANTS TAKING TO ACCOUNT ACTIVE SOUND SOURCES

Vasilyev A.V.

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str.
Samara, Russian Federation
443100
avassil62@mail.ru

This paper is devoted to the problems of modelling and calculation of propagation of low frequency sound in gas guides of power plants taking to account active sound sources. The structure of software for prediction and calculation of low-frequency sound propagation in gas guides have described. Software uses four-pole method and takes to account radiation from additional (active) sound course. By using software it is possible to estimate sound source parameters to provide efficient sound attenuation. Examples of software application to calculation of intake and exhaust noise of internal combustion engine are described. The results of calculations show the possibilities of four-pole method software using to design acoustically the parameters of gas guides and mufflers for the different fields of applications.

Key words: *low-frequency sound; gas guides; power plant; modelling; calculation; software*

References

- [1] Vasilyev A.V. Reduction of Low Frequency Noise and Vibration in Gas Guides of Power Plants. Book. Edition of St.-Petersburg Polytechnic University, Russia, 2004. – P:294.
- [2] Vasilyev A.V. Acoustic Modeling and Complex Reduction of Noise of Automobile Internal Combustion Engines. Book. Edition of Samara Scientific Center of Russian Academy of Science, Samara, Russia, 2004. P:296.
- [3] Vasilyev A.V. Modeling and Reduction of Low Frequency Noise and Vibration of Power Plants and Joining Mechanical Systems. Book - Samara, Edition of Samara Scientific Center of Russian Academy of Science, Samara, Russia, 2011 p.: 216.
- [4] Vasilyev A.V. About the experience of research and reduction of vibration of compressor plants. Sc. Journal "Noise Theory and Practice", 2016, Vol.2, No2, pp. 27-34. ISSN 2412-8627.
- [5] Vasilyev A.V., Komlik E.A. Methodic of Calculation and Experimental Research of Noise of the System "Vehicle's Tires – Road Surface". Proc. of the Scientific Edition "The Bulleting of Samara Scientific Center of Russian Academy of Sciences", Samara, 2012, Volume 14, No 1(3), pp. 849-851.
- [6] Vladislavlev, A.S. etc. Pipelines of piston compressor machines. Machine-building edition, Moscow, 1972.
- [7] Lukanin V.N., Gudtsov V.N., Bocharov N.F. Automobile noise reduction. Moscow, "Mashinostroenie", 1981.
- [8] Ivanov N.I., Nikiforov A.S. Foundations of Vibration and Acoustics: book – St.-Petersburg, Polytechnika, 2000. – p. 482 (in Russian).
- [9] Munjal M.L. Acoustics of ducts and mufflers. New York, Wiley Interscience, 1987.