

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕНОПОЛИУРЕТАНА, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

© 2021

А. В. Кузнецов аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; al.vl.kuznetsov@mail.ru

А. А. Иголкин доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; igolkin97@gmail.com

А. И. Сафин кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; artursafin1988@gmail.com

А. О. Пантюшин студент; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; ao.pantyushin@mail.ru

При решении задачи снижения акустической нагрузки на космический аппарат при старте и полёте ракеты-носителя проводится конечно-элементное моделирование акустических процессов под головным обтекателем. Для успешного решения этой задачи необходима математическая модель акустических характеристик материала, применяемого для увеличения звукоизоляции. Существующие математические модели акустических характеристик материалов не подходят для рассматриваемого материала, который может применяться в ракетно-космической технике для увеличения звукоизоляции сборочно-защитного блока. Для получения коэффициента звукопоглощения материала используется метод измерения в импедансной трубе с двумя микрофонами. С помощью метода дифференциальной эволюции подбираются коэффициенты математической модели акустических характеристик типа Делани-Бэзли для указанного материала. Проведено сравнение коэффициента звукопоглощения, полученного экспериментальным путём и вычисленного с помощью полученной модели, и показана средняя и максимальная величина ошибки. Полученная модель позволит проводить конечно-элементное моделирование акустических и виброакустических процессов под головным обтекателем с учётом расположения звукопоглощающего материала.

Коэффициент звукопоглощения; сборочно-защитный блок; дифференциальная эволюция; пористый пенополиуретан

Цитирование: Кузнецов А.В., Иголкин А.А., Сафин А.И., Пантюшин А.О. Математическая модель акустических характеристик пенополиуретана, применяемого для звукопоглощения в ракетно-космической технике // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 2. С. 53-62. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-53-62

Введение

В настоящее время актуальной задачей в ракетно-космической и авиационной технике является уменьшение уровня шума, действующего на окружающую среду и полезную нагрузку. В ракетно-космической технике наиболее актуальной задачей является разработка конструктивных мероприятий по уменьшению уровня акустического давления на космический аппарат (КА) путём нанесения дополнительного звукопоглощаю-

шего материала на внутреннюю поверхность сборочно-защитного блока (СЗБ) [1]. Так, в работе [2] рассматривается решение задач снижения акустического давления (АД) для СЗБ 11С516 ракеты-носителя (РН) Союз (рис. 1).

Сдерживающим фактором широкого применения методов конечных и граничных элементов при решении задач уменьшения шума на полезную нагрузку является отсутствие математических моделей акустических характеристик применяемых материалов. Этими основными акустическими характеристиками являются импеданс среды (материала) и постоянная распространения [3]. Наличие двух этих параметров для материала позволяет проводить моделирование акустических и виброакустических процессов при решении задач прогнозирования уровня акустической нагрузки, позволяет изменять геометрические параметры используемого звукопоглощающего материала, появляется возможность оптимизации этих геометрических параметров. Экспериментальные исследования позволяют получить импеданс поверхности и коэффициент звукопоглощения, которые в свою очередь зависят и от толщины образца [3]. Использование этих характеристик при решении задач в 3D-постановке не позволяет варьировать толщиной и геометрическими параметрами, а учёт только нормального падения плоских волн является допущением. Кроме того коэффициент звукопоглощения может охарактеризовать только акустические свойства, тогда как постоянная распространения является также и механической характеристикой.

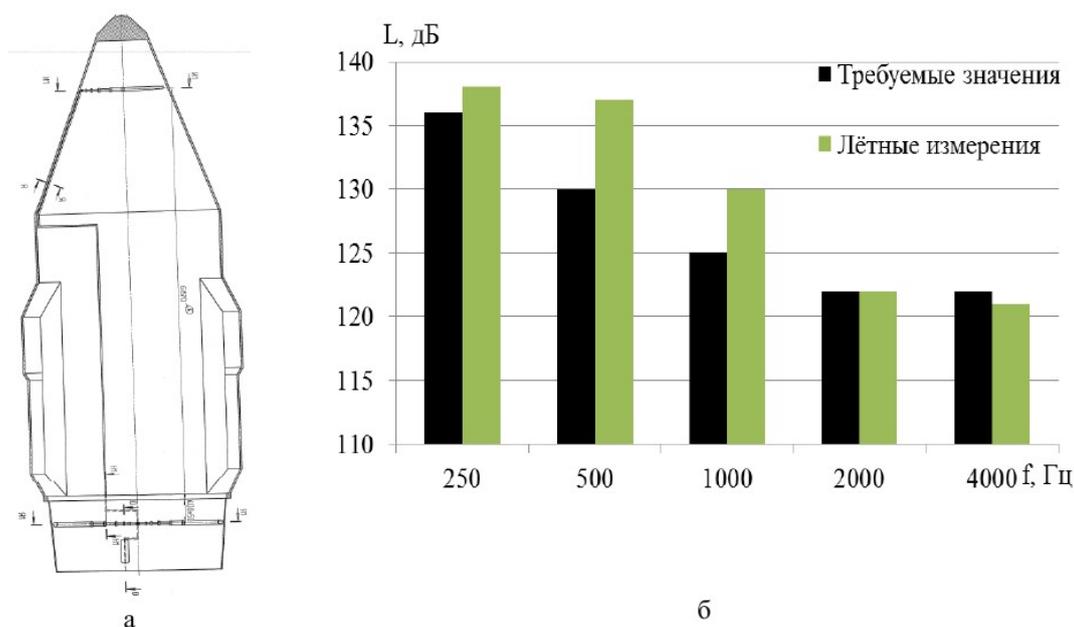


Рис. 1. Обводы СЗБ 11С516 РН «Союз» (а), уровни АД для СЗБ и КА (б) [2]

Одним из материалов, используемых в ракетно-космической технике для звукопоглощения, является пористый пенополиуретан ППУ [1; 2]. Анализ существующих моделей [4 – 8] и экспериментальных данных, коэффициента звукопоглощения показывает, что существующие математические модели плохо описывают акустические свойства применяемого материала (рис. 2). Среди показанных моделей больше остальных соответствует экспериментальным данным модель Ворониной, а наибольшее отличие от экспериментальных данных для модели *Wi*. На рис. 2 для некоторых моделей приведён модуль разности экспериментальных и расчётных значений, $\Delta\alpha$.

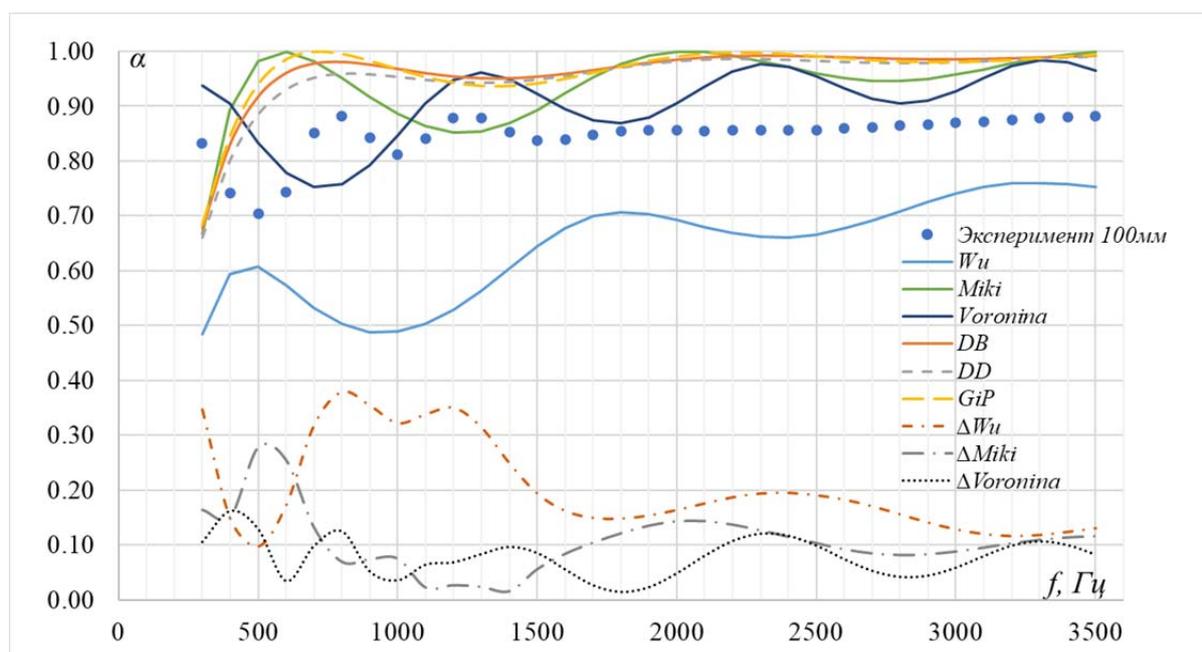


Рис. 2. Экспериментальные данные и модели на графике для образца толщиной 100 мм:
DB – модель *Delaney and Bazley*; *DD* – модель *Dunn and Davern*; *GiP* – модель *Garai and Pompoli*;
Wu – модель *Quili Wu*; *Miki* – модель *Miki*; *Voronina* – модель *Ворониной*;
 ΔWu , $\Delta Miki$, $\Delta Voronina$ – модуль разности экспериментальных и расчётных данных
 для соответствующих моделей

В связи с этим появляется необходимость разработать математическую модель, которая бы описывала акустические характеристики данного материала. В то же время для ряда моделей, например для модели Био-Джонсона-Шампу-Алларда (*Biot-Johnson-Champoux-Allard*) [7], описывающей акустические характеристики пористых материалов с податливым скелетом, необходимо проводить обширные экспериментальные исследования для получения таких физических величин как: тепловая длина, вязкостная длина, извилистость, комплексный модуль сдвига, коэффициент Био (*Biot*) [8]. Иногда данные характеристики подбирают на основе имеющихся экспериментальных данных акустических измерений [9]. С помощью метода дифференциальной эволюции [10] предлагается подобрать коэффициенты для моделей типа Делани-Бэзли [7; 8].

Минимизация невязки между экспериментальными и теоретическими характеристиками проводится с целью разработки математической модели материала, которая представляет собой зависимости характеристического импеданса (импеданса среды) и постоянной распространения от частоты. Эти характеристики позволяют вычислить аналитически или с помощью численного моделирования звукопоглощающие свойства любой конфигурации и геометрической формы, в то время как коэффициент звукопоглощения – это величина, характеризующая определённую конструкцию. В данном случае экспериментальные данные – это характеристики образцов. Если в последующем при разработке мероприятий по увеличению звукоизоляции взять другую толщину материала, которая, например, больше, чем толщина образцов в эксперименте, или, например, добавить какой-либо материал за поглотителем (образцом), то учитывать полученный экспериментальным путём коэффициент будет не совсем корректно.

Основы применяемого метода

Метод дифференциальной эволюции представляет собой стохастический метод оптимизации с идеями генетических алгоритмов [10]. Данный метод использует принцип, идею генетического алгоритма, но в то же время более прост, так как является прямым методом, то не требует вычисления производных функции. Нет необходимости в проведении бинарных операций. Данный метод хорошо зарекомендовал себя при поиске глобальных экстремумов функции при решении подобных задач [9; 10]. В то время как многие другие алгоритмы, основанные на вычислении значения функции, могут быть заиклены или могут быть требовательны к виду функции (например, метод Пауэлла), и хорошо работают при поиске локальных экстремумов, этот метод хорошо зарекомендовал себя при поиске глобального экстремума (минимума) и не зависит от вида функции и числа переменных [11]. Так как число переменных не слишком большое, то не проводится оценка быстродействия. Настройки алгоритма касаются сходимости и времени поиска, которые напрямую связаны с точностью алгоритма: можно рассмотреть большее число вариантов комбинации переменных при уменьшении «шага» изменения. В данной задаче настройки алгоритма не существенно сказывались на результате.

Как правило, данный метод реализуется в виде алгоритмов нахождения минимума функции нескольких переменных [10]. Обозначим минимизируемую функцию в виде среднеквадратического отклонения расчётных и экспериментальных данных:

$$F(x_1, \dots, x_i) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\alpha_f - \alpha_{ex})_j^2}, \quad (1)$$

где $F(x_1, \dots, x_i)$ – функция ошибки; α_f – вычисляемое значение коэффициента звукопоглощения; α_{ex} – экспериментальное значение коэффициента звукопоглощения; i – число искомых переменных; j – число точек поиска.

Тогда, минимизируя функцию ошибки (1), можно подобрать коэффициенты, с помощью которых вычисляется импеданс и постоянная распространения, исходя из формул для модели Делани-Бэзли [7;8]:

$$\operatorname{Re} Z_c = \rho_0 c_0 \left[1 + C_1 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-C_2} \right], \quad (2)$$

$$\operatorname{Im} Z_c = -\rho_0 c_0 \left[C_3 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-C_4} \right], \quad (3)$$

$$\operatorname{Re} \gamma = \frac{2\pi f}{c_0} \left[C_5 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-C_6} \right], \quad (4)$$

$$\operatorname{Im} \gamma = \frac{2\pi f}{c_0} \left[1 + C_7 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-C_8} \right]. \quad (5)$$

С помощью импеданса среды и постоянной распространения находятся импеданс поверхности и коэффициент звукопоглощения (КЗП) в соответствии с формулами [3; 7]:

$$Z_s = Z_c \operatorname{ctg}(\gamma \cdot h), \quad (6)$$

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \right|^2, \quad (7)$$

где ρ_0 – плотность воздуха; c_0 – скорость звука в воздухе; r – удельное сопротивление потоку [12]; h – толщина образца.

Минимизация функции (1) может быть осуществлена различными способами и со множеством настроек. В данном случае минимизация осуществляется с использованием языка программирования Python на основе открытой библиотеки Scipy в следующей последовательности:

1. Формирование начальной популяции на основе равномерного распределения переменных в указанном диапазоне.

2. Генерация 20 особей и вычисление на их основе значения искомой функции. Опытным путём установлено, что дальнейшее увеличение числа начальных особей не влияет на конечный результат, но увеличивает время вычислений. На этом же шаге проводится выбор двух случайных кандидатов (при равномерном распределении) и получение на их основе нового кандидата:

$$X' = X_0 + a(X^* - X_0) + a(X_i + X_j), \quad (8)$$

где X_0, X_i, X_j – начальный (базовый) и случайные члены популяции соответственно; X^* – наилучший из выборки член популяции, при котором функция $F(x_1, \dots, x_i)$ получает минимальное значение; a – коэффициент мутации (параметр, задаваемый в диапазоне (0,5;1,98)).

3. Селекция особей, выбор наилучшего кандидата, который на следующем шаге становится X_0 . Как видно из формулы (8), наилучший кандидат в течение одной итерации участвует в мутации новых особей.

Одной из настроек данного алгоритма является рекомбинация, или кроссовер Cr [10], которая задаёт вероятность наследования признака (значения переменной) от мутантного члена популяции на следующий шаг. Рекомбинация осуществляется с помощью биномиального распределения [10].

Последовательность действий будет повторяться, пока не пройдёт заданное число итераций или не достигнет сходимости, определяемой настройками алгоритма [10]. Опытным путём выявлено, что 4000 итераций достаточно для достижения сходимости. Дальнейшее увеличение числа итераций не влияет на конечный результат, но увеличивает время вычислений.

Из анализа [4 – 8] переменные C_1, \dots, C_2 в выражениях (2) – (5) располагаются в интервале (0; 1). В данном случае для лучшего результата интервал был увеличен до (-2; 2).

Экспериментальные исследования и разработка математической модели

Акустические характеристики ППУ-40-08 получены с помощью метода измерения в импедансной трубе с двумя микрофонами [3]. Проведены измерения для образцов различной толщины. Примеры образцов и схема экспериментальной установки представлены на рис. 3.

Для образцов одной толщины результирующие значения усреднялись. Значения коэффициента звукопоглощения, измеренные для некоторых толщин, представлены на рис. 4. Результат подбора коэффициентов представлен в табл. 1.

На рис. 5, 6 представлены расчётные и экспериментальные значения коэффициента звукопоглощения для образцов 10 – 100 мм, а также модуль разности расчётных и экспериментальных значений $\Delta\alpha$. Как видно из рис. 2 и 6, разработанная модель даёт лучшее соответствие экспериментальным данным, чем указанные на рис. 2 модели (для толщины 100 мм).

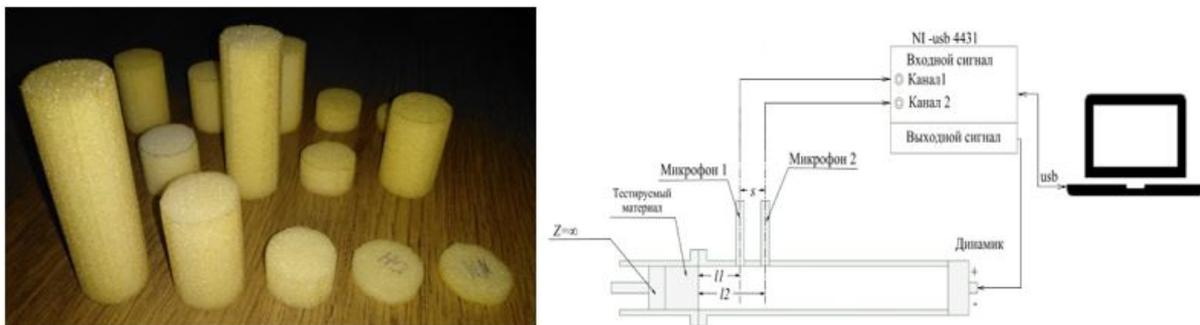


Рис. 3. Образцы для измерений коэффициента звукопоглощения и схема экспериментальной установки

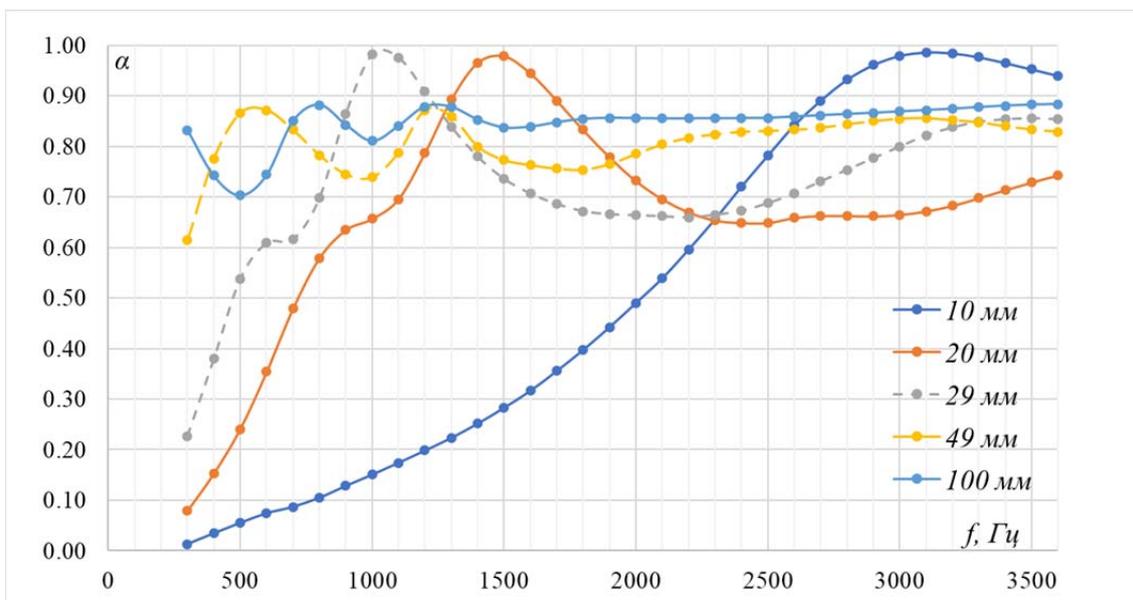


Рис. 4. Экспериментальные исследования образцов материала ППУ-40-08 различной толщины, мм

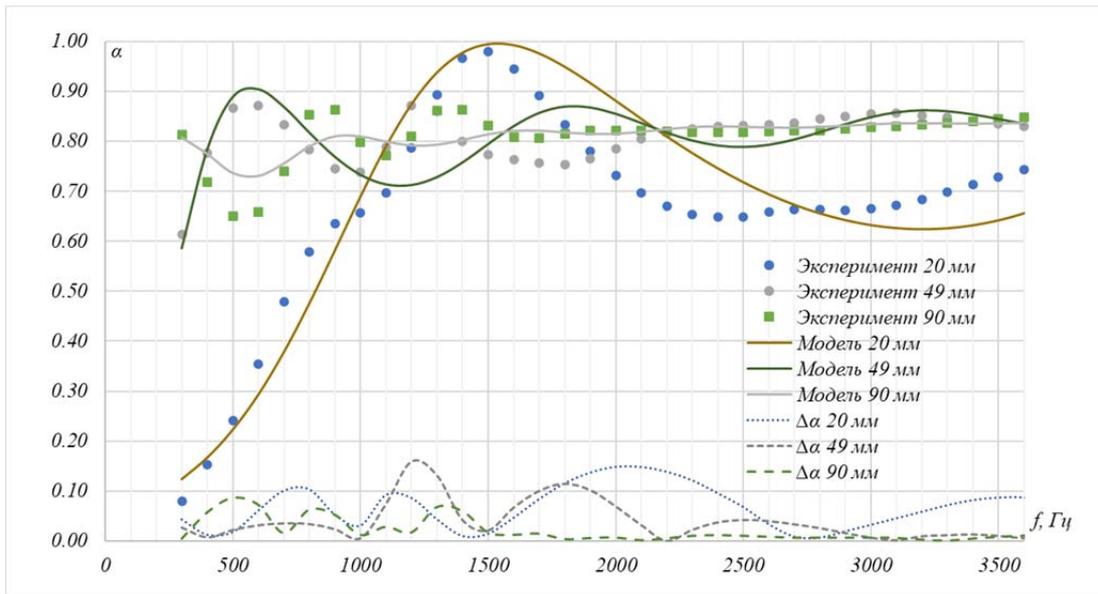


Рис. 5. Расчётные и экспериментальные данные:
 Эксперимент – экспериментальные данные для обозначенной толщины;
 Модель – расчётные данные, полученные с помощью разработанной модели;
 $\Delta\alpha$ – модуль разности экспериментальных и расчётных значений

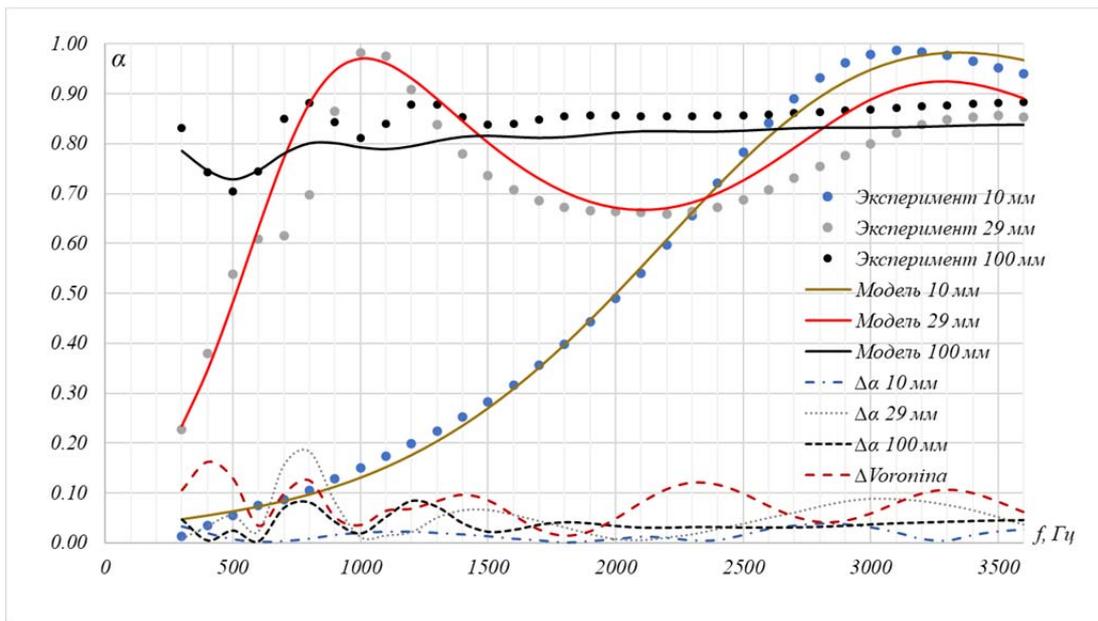


Рис. 6. Расчётные и экспериментальные данные:
 Эксперимент – экспериментальные данные для обозначенной толщины;
 Модель – расчётные данные, полученные с помощью разработанной модели;
 $\Delta\alpha$ – модуль разности экспериментальных и расчётных значений

В табл. 1 приведены коэффициенты полученной математической модели материала ППУ-40-08, для которого значение удельного сопротивления потоку r равно $10123 \pm 2050 \text{ Па}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ [12].

Таблица 1. Коэффициенты новой модели

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
1,166	0,087	0,308	0,417	0,321	0,599	1,469	0,171

Заключение

Разработана математическая модель пенополиуретана марки ППУ-40-08, актуального для применения в ракетно-космической технике. Проведены экспериментальные исследования указанного материала и получены коэффициенты звукопоглощения указанного материала для образцов толщиной 10-100 мм. Максимальная неопределённость измерений составляет 0,221 для 13 образцов толщиной 10 мм, в третьоктавной полосе частот со среднегеометрической частотой 2500 Гц. Сравнение экспериментальных и расчётных данных показало, что средняя величина разности между ними составляет 0,04, а максимальное отличие составляет 0,18. Данная модель позволяет проводить конечно-элементное моделирование акустических и виброакустических процессов под головным обтекателем РН для последующего снижения уровня акустического давления, действующего на полезную нагрузку.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых кандидатов наук МК-1944.2020.8.

Библиографический список

1. Попов П.А., Синдюков А.А. Конструктивные мероприятия по снижению акустического давления внутри изделий ракетно-космической техники // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2014. № 1 (43). С. 68-79. DOI: 10.18287/1998-6629-2014-0-1(43)-68-79
2. Попов П.А. Разработка методики снижения акустического нагружения на полезную нагрузку в составе ракеты-носителя. Дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2018. 150 с.
3. Иголкин А.А., Родионов Л.В., Шахматов Е.В., Кох А.И. Звукопоглощение. Методы измерений: электрон. учеб. пособие. Самара: СГАУ, 2010. 59 с.
4. Voronina N.N. An empirical model for elastic porous materials // Applied Acoustics. 1998. V. 55, Iss. 1. P. 67-83. DOI: 10.1016/S0003-682X(97)00098-4
5. David A.B., Hansen C.H. Engineering noise control. London: Spon Press, 2009. 768 p.
6. Miki Y. Acoustical properties of porous materials. Modifications of Delany-Bazley models // Journal of the Acoustical Society of Japan. 1990. V. 11, Iss. 1. P. 19-24. DOI: 10.1250/ast.11.19
7. Kino N., Nakano G., Suzuki Y. Non-acoustical and acoustical properties of reticulated and partially reticulated polyurethane foams // Applied Acoustics. 2012. V. 73, Iss. 2. P. 95-108. DOI:10.1016/j.apacoust.2011.06.009
8. Allard J.F. Propagation of sound in porous media. New York: Elsevier Applied Science, 2009. 358 p.
9. Gardner G.C., O'Leary M.E., Hansen S., Sun J.Q. Neural networks for prediction of acoustical properties of polyurethane foams // Applied Acoustics. 2003. V. 64, Iss. 2. P. 229-242. DOI: 10.1016/S0003-682X(02)00089-0
10. Price K.V., Storn R.M., Lampinen J.A. Differential evolution. A practical approach to global optimization. Berlin: Springer, 2006. 539 p. DOI: 10.1007/3-540-31306-0
11. Кочегурова Е.А. Теория и методы оптимизации. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 157 с.
12. ГОСТ EN 29053-2011. Материалы акустические. Методы определения сопротивления продуванию потоком воздуха. М.: Стандартинформ, 2012. 11 с.

MATHEMATICAL MODEL OF ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF POLYURETHANE FOAM USED FOR SOUND ABSORPTION IN AEROSPACE ENGINEERING

© 2021

- A. V. Kuznetsov** Postgraduate Student of the Department of Power Plant Automatic Systems; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; al.vl.kuznetsov@mail.ru
- A. A. Igolkin** Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Power Plant Automatic Systems; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; igolkin97@gmail.com
- A. I. Safin** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Power Plant Automatic Systems; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; artursafin1988@gmail.com
- A. O. Pantyushin** Student; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; ao.pantyushin@mail.ru

When solving the problem of reducing the acoustic load on the spacecraft during the launch and flight of the launch vehicle, finite element modeling of acoustic processes under the nose fairing is carried out. To successfully solve this problem, a mathematical model of the acoustic characteristics of the material used for sound insulation is required. The existing mathematical models of the acoustic characteristics of materials are not suitable for the material under consideration that can be used in rocket and space technology to increase the sound insulation of the payload fairing + transfer compartment assembly. To obtain the sound absorption coefficient of the material, an impedance tube measurement method with two microphones is used. Using the method of differential evolution, the coefficients of a mathematical model of acoustic characteristics of the Delany-Bazley type for the specified material are selected. The sound absorption coefficient obtained experimentally and that calculated using the obtained model are compared; the average and maximum values of the error are shown. The resulting model will make it possible to carry out finite element modeling of acoustic and vibroacoustic processes under the nose fairing, taking into account the location of the sound-absorbing material.

Sound absorption coefficient; payload fairing and transfer compartment assembly; differential evolution; polyurethane foam

Citation: Kuznetsov A.V., Igolkin A.A., Safin A.I., Pantyushin A.O. Mathematical model of acoustic characteristics of polyurethane foam used for sound absorption in aerospace engineering. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 2. P. 53-62. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-53-62

References

1. Popov P.A., Sindyukov A.A. Constructive actions for decreasing the acoustic pressure inside space-rocket products. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2014. No. 1 (43). P. 68-79. (In Russ.). DOI: 10.18287/1998-6629-2014-0-1(43)-68-79
2. Popov P.A. *Razrabotka metodiki snizheniya akusticheskogo nagruzheniya na poleznuyu nagruzku v sostave rakety-nositelya. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of a technique for reducing the acoustic load on a payload as part of a launch vehicle. Candidate's dissertation (Engineering)]. Samara, 2018. 150 p.
3. Igolkin A.A., Rodionov L.V., Shakhmatov E.V., Kokh A.I. *Zvukopogloshchenie. Metody izmereniy: elektron. ucheb. posobie* [Sound absorption. Measurement methods: electronic study guide]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2010. 59 p.
4. Voronina N.N. An empirical model for elastic porous materials. *Applied Acoustics*. 1998. V. 55, Iss. 1. P. 67-83. DOI: 10.1016/S0003-682X(97)00098-4

5. David A.B., Hansen C.H. Engineering noise control. London: Spon Press, 2009. 768 p.
6. Miki Y. Acoustical properties of porous materials. Modifications of Delany-Bazley models. *Journal of the Acoustical Society of Japan*. 1990. V. 11, Iss. 1. P. 19-24. DOI: 10.1250/ast.11.19
7. Kino N., Nakano G., Suzuki Y. Non-acoustical and acoustical properties of reticulated and partially reticulated polyurethane foams. *Applied Acoustics*. 2012. V. 73, Iss. 2. P. 95-108. DOI:10.1016/j.apacoust.2011.06.009
8. Allard J.F. Propagation of sound in porous media. New York: Elsevier Applied Science, 2009. 358 p.
9. Gardner G.C., O'Leary M.E., Hansen S., Sun J.Q. Neural networks for prediction of acoustical properties of polyurethane foams. *Applied Acoustics*. 2003. V. 64, Iss. 2. P. 229-242. DOI: 10.1016/S0003-682X(02)00089-0
10. Price K.V., Storn R.M., Lampinen J.A. Differential evolution. A practical approach to global optimization. Berlin: Springer, 2006. 539 p. DOI: 10.1007/3-540-31306-0
11. Kochegurova E.A. *Teoriya i metody optimizatsii* [Optimization theory and methods]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ., 2012. 157 p.
12. GOST EN 29053-2011. Acoustical materials. Methods for determination of airflow resistance. Moscow: Standartinform Publ., 2012. 11 p. (In Russ.)