

УДК: 534.833.534

OECD: 1.03.AA

Численное исследование акустических процессов в модельных каналах для разработки авиационных звукопоглощающих конструкций на основе конического заполнителя

Писарев П.В.¹, Ахунзянова К.А.^{2*}¹ Доцент каф. МКМК, ПНИПУ, г. Пермь, РФ² М.н.с. каф. МКМК, ПНИПУ, г. Пермь, РФ

Аннотация

Настоящая работа посвящена исследованию акустической эффективности ячеек звукопоглощающей конструкции конической формы в канале с потоком. В рамках выполненных исследований сформулирована физическая и математическая модель, описывающая акустические процессы в каналах, оснащенных звукопоглощающими конструкциями, учитывающая пограничный слой в районе резонаторов и диссипацию энергии при наличии потока. Проведено численное исследование акустической эффективности ячеек звукопоглощающих конструкций конической формы в модельном канале прямоугольного сечения при наличии потока. Выявлены основные механизмы снижения интенсивности акустической волны за счет взаимодействия с взаимно перевернутыми конусообразными ячейками. Установлено влияние потока на акустические характеристики рассматриваемых звукопоглощающих конструкций. Обнаружено, что звукопоглощающие конструкции на основе взаимно перевернутых конусов являются акустически эффективнее по сравнению с ЗПК с сотовыми ячейками.

Ключевые слова: звукопоглощающие конструкции, акустическая эффективность, резонансная частота, канал с потоком, конусообразные ячейки.

Numerical study of acoustic processes in model channels for the development of wideband aviation sound-absorbing structures based on conical filler

Pisarev P.V.¹, Akhunzianova K.A.^{2*}¹ Associate Professor of the Department MCMC, PNRPU, Perm, Russia² Junior research assistant of the Department MCMC, PNRPU, Perm, Russia

Abstract

The present work is devoted to the study of the acoustic efficiency of the cells of a conical sound-absorbing structure in a channel with a flow. The physical and mathematical model describing acoustic processes in channels equipped with sound-absorbing structures, taking into account the boundary layer in the area of resonators and the dissipation of energy in the presence of flow has been formulated. A numerical study of the acoustic efficiency of cells of sound-absorbing conical structures in a model channel of rectangular cross-section in the presence of flow was carried out. The main mechanisms of acoustic wave intensity reduction due to the interaction with the mutually-inverted conical cells are revealed. The influence of the flow on the acoustic characteristics of the analyzed sound-absorbing structures has been established. It has been found that sound-absorbing structures based on mutually inverted cones are acoustically more efficient compared to cellular-cell sound-absorbing structures.

*E-mail: karina-maksimova0402@yandex.ru (Ахунзянова К.А.)

Keywords: *sound-absorbing structures, acoustic efficiency, resonant frequency, flow channel, cone-shaped cells.*

Введение

Звукопоглощающие конструкции (ЗПК) используются для снижения шума авиационных силовых установок почти шесть десятилетий. Первые ЗПК представляли собой однослойную панель, которую настраивали на поглощение отдельных тонов (например, кратных частоте прохождения рабочей лопатки вентилятора). Традиционно резонансные ЗПК состоят из совокупностей сотовых ячеек – резонаторов Гельмгольца, расположенных по заданной схеме между силовой и перфорированной пластиной [1-7].

В настоящее время в авиационной промышленности используются двухконтурные турбореактивные двигатели (ТРДД), в связи с чем значительно увеличивается шум от различных источников, таких как шум вентилятора, турбины и камеры сгорания [8, 9]. Для снижения шума в ТРДД традиционно используют многослойные ЗПК (двух, трех и четырехслойные). Однако применение многослойных конструкций приводит к увеличению массы, себестоимости и снижению жесткости [6, 10]. Можно с уверенностью сказать, что в настоящий момент такие конструкции полностью исчерпали свой потенциал. Дальнейшее совершенствование эффективности создаваемых ЗПК требует решения новых научных задач и исследований в области аэроакустики.

Вместе с тем актуальность данных исследований обусловлена необходимостью повышения конкурентоспособности отечественной гражданской авиации на международном рынке. Нормы международной организации гражданской авиации ИКАО по шуму самолетов на местности неуклонно ужесточаются. С 2018 года для среднемагистральных самолетов весом до 55 т требования по уровню шума стали жестче на 7EPN dB, и этим нормам не соответствует большинство зарубежных и ни один эксплуатируемый ныне самолет российского производства.

Для решения проблемы требуется серьезная интенсификация усилий в разработке подходов и систем снижения авиационного шума [6, 7, 10-14]. Наиболее эффективным способом является применение в конструкции авиадвигателей ЗПК, настроенных таким образом, чтобы обеспечить максимальное ослабление звука при его распространении вдоль каналов двигателя и мотогондол в различных эксплуатационных условиях.

Создание новых звукопоглощающих конструкций (ЗПК) для перспективных двигателей является сложной задачей, требующей проектирования и разработки новых технологий изготовления таких конструкций. Этот процесс включает в себя несколько этапов, начиная с моделирования и расчета конструкции, и заканчивая выбором материалов и оптимальных технологических режимов изготовления ЗПК [15].

Одним из ключевых аспектов проектирования ЗПК является численное моделирование распространения акустической волны в свободном объеме канала. Численное моделирование позволяет оценить работу ЗПК и внести необходимые корректировки до изготовления. Однако необходимо отметить, что разработка ЗПК для новых перспективных двигателей является непрерывным процессом. С появлением новых материалов и технологий требуется усовершенствование конструкции и повышение ее акустической эффективности.

ЗПК широко используются во многих отраслях промышленности, включая авиационные двигатели, в качестве эффективных узкополосных шумоглушителей, особенно на низких частотах. Однако большинство исследований проведено без влияния набегающего потока, в то время как применяемые в авиационном двигателестроении

ЗПК подвергаются воздействию набегающего потока, который обладает нелинейными свойствами.

В связи с этим, разработка систем взаимодействующих резонансных ячеек, способных эффективно поглощать звук в широком диапазоне рабочих частот, является актуальной задачей в современной аэроакустике. В рамках настоящей работы проведены численные исследования по расчету акустической эффективности ячеек конической формы при наличии потока.

1. Численное моделирование акустических процессов в модельных каналах

Авторами данной работы были проведены исследования по оценке акустической эффективности единичных ячеек сотовых и конусообразных звукопоглощающих конструкций в интерферометре с нормальным падением звуковой волны при линейном и нелинейном режиме работы [16]. Выявлено влияние формы резонатора на его акустическую эффективность и резонансную частоту при одинаковом объеме. Определено, что коэффициент звукопоглощения конусообразного резонатора выше, чем у сотового резонатора на 9%.

Исходя из вышеперечисленных исследований, в качестве объектов настоящего исследования рассматривались звукопоглощающие конструкции на основе взаимно перевёрнутых конусообразных ячеек (рис. 1). Кроме этого, рассматривались единичная конусообразная и перевёрнутая конусообразная ячейки.

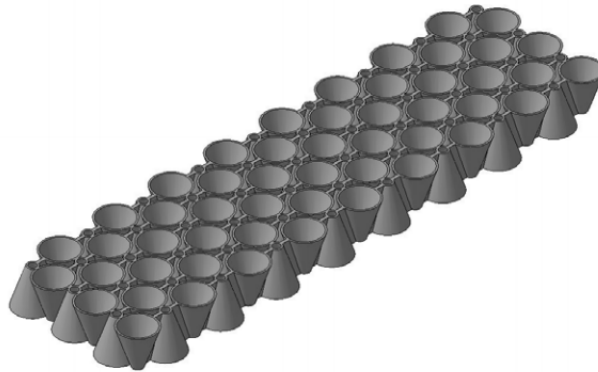


Рис. 1. Общий вид звукопоглощающей конструкции на основе взаимно перевёрнутых конусообразных ячеек

Резонаторы размещались по центру модельного канала прямоугольного сечения. Канал прямоугольного сечения имеет длину 400 мм и поперечное сечение 20x20 мм. Общий вид геометрической модели представлен на рисунке 2. На канале конечной длины прямоугольного сечения (1) по центру на одной из продольных граней расположены ячейки конусообразной формы (2), которые соединены с каналом «узким» горлом (3).

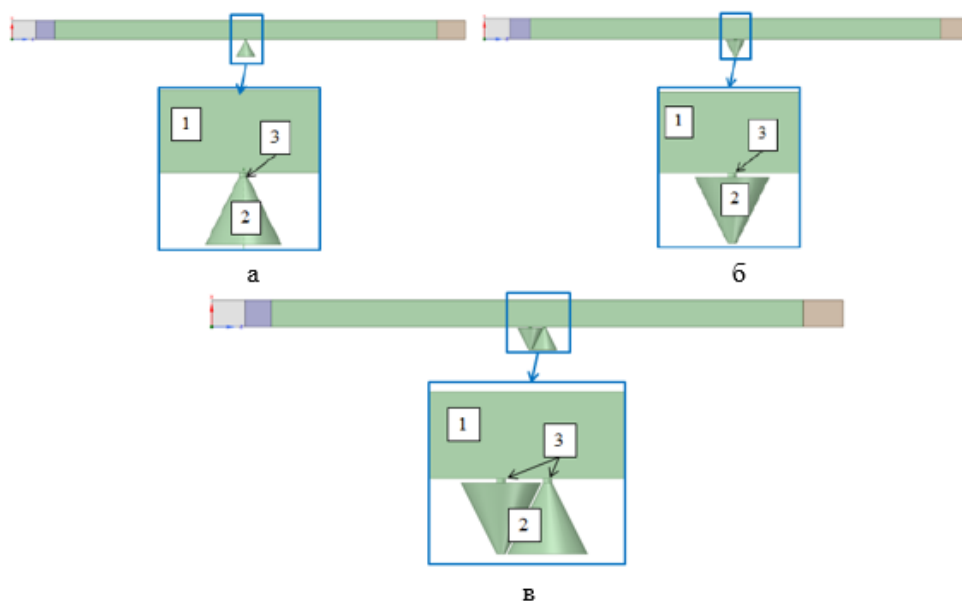


Рис. 2. Общий вид геометрической модели а) с конусообразной ячейкой, б) с перевернутой конусообразной ячейкой, в) с парой взаимно перевернутых конусов

Решение задачи по расчету акустической эффективности ячеек звукопоглощающей конструкции с ячейками конической формы осуществлялось в два этапа. На первом этапе решалась стационарная задача по расчету газодинамических характеристик вязкого, сжимаемого газа, движущегося по каналу прямоугольного сечения. Процессы рассматривались в трехмерной постановке, поток газа рассматривался однофазным. Считалось, что стенки канала и ЗПК адиабатические и не проницаемы. Численный расчет осуществлялся без учета гравитации. В качестве модели турбулентности принималась модель SST.

На втором этапе моделировалось распространение гармонической акустической волны в свободном объеме канала с потоком, с учетом потерь на трение и теплопроводность. Акустическая волна задавалась в виде фонового акустического поля. При решении акустической задачи использовались уравнения Навье-Стокса, линеаризованные в частотной области. По результатам численного моделирования производился расчет коэффициента потери акустического давления (TL) на выходе из модельного канала.

Разработанная численная модель распространения акустической волны в свободном объеме канала с потоком состоит из двух областей (рис. 3):

- 1) для области Θ моделировалось распространение сжимаемого газа по свободному объему канала;
- 2) для области Ψ моделировалось распространение гармонической звуковой волны, задаваемой с поверхности, не отражающей границы.

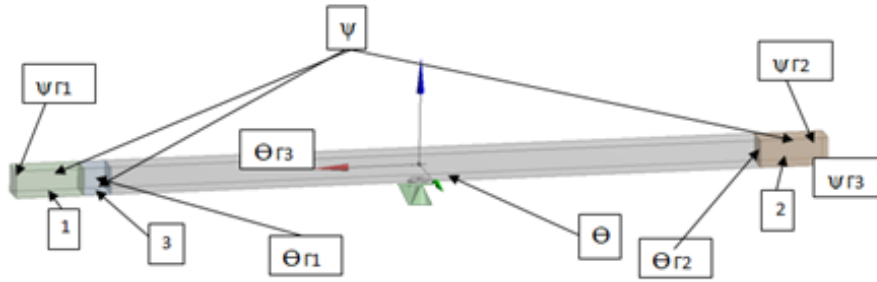


Рис. 3. Общий вид расчетной области канала, где: 1, 2 – идеально согласующий слой (PML) на входе и выходе; 3 – Background Acoustics Field

Расчетные подобласти (1, 2) (PML) представляют собой искусственные слои, добавляемые к вычислительной области моделирования, чтобы обеспечить поглощение входящих и исходящих волн, которые находятся вне основной области моделирования, что позволяет моделировать распространение волн с открытыми границами.

Для расчетной подобласти (3) (Background Acoustics Field) задавалась акустическая волна, как функция фона в конечном объеме, который граничит с идеально согласующим слоем (1) (PML). Благодаря такой компоновке, отраженные волны могут свободно покидать область Θ , как по направлению распространения волны и потока, так и против направления.

Математическая модель основывается на законах сохранения массы, импульса и энергии, замкнутая уравнением состояния идеального сжимаемого газа и турбулентности, а также начальными и граничными условиями.

Расчетная сетка использовалась с ячейками, близкими к форме равностороннего тетраэдра, для получения эффективного и точного результата и снижения погрешностей. Максимальный размер элемента определялся как $N_{max} = 343[m/s]/6[кГц]/10 = 0,0057$ м, минимальный размер элемента принимался $N_{min} = 0,001$ м. Общее количество элементов составило 140 тысяч. Основными требованиями при измельчении сетки были: 1. Отсутствие резких отличий геометрических размеров соседних ячеек. Гарантия, что соседние ячейки имеют примерно одинаковый размер и форму, что важно для точных расчетов. 2. Линейные размеры соседних ячеек не отличаются более чем в 2 раза. Предотвращение ситуации, когда некоторые ячейки являются значительно крупнее или мельче остальных, что может привести к неточным результатам. 3. Коэффициент потери акустического давления (transmission loss) не изменяется при дальнейшем измельчении конечно-элементной сетки. Отслеживалось, чтобы при увеличении числа ячеек и уменьшении их размера, результаты численного эксперимента остаются стабильными и не меняются значительно.

Все эти требования были учтены при выборе и применении алгоритма измельчения сетки, чтобы обеспечить точность и сходимость численного эксперимента.

2. Анализ полученных результатов

По результатам вычислительных экспериментов были построены графики зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты (рис. 4, 5, 8) при трех числах Маха ($M = 0$, $M = 0,01$ и $M = 0,05$). Поля распределения акустического давления в продольном сечении модельного канала представлены на рисунках 6, 7, 9, 10.

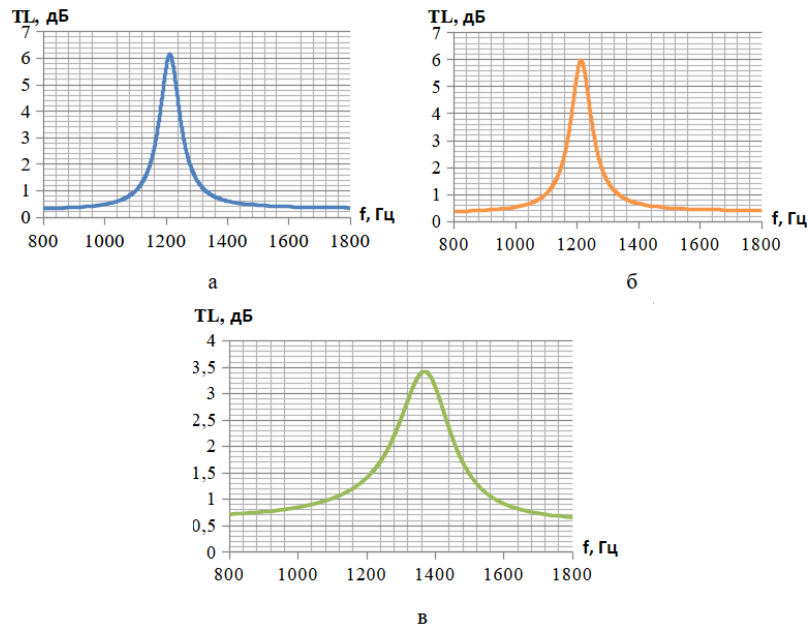


Рис. 4. Зависимости коэффициента потери акустического давления от частоты для конусообразной ячейки, где а) $M = 0$; б) $M = 0,01$; в) $M = 0,05$

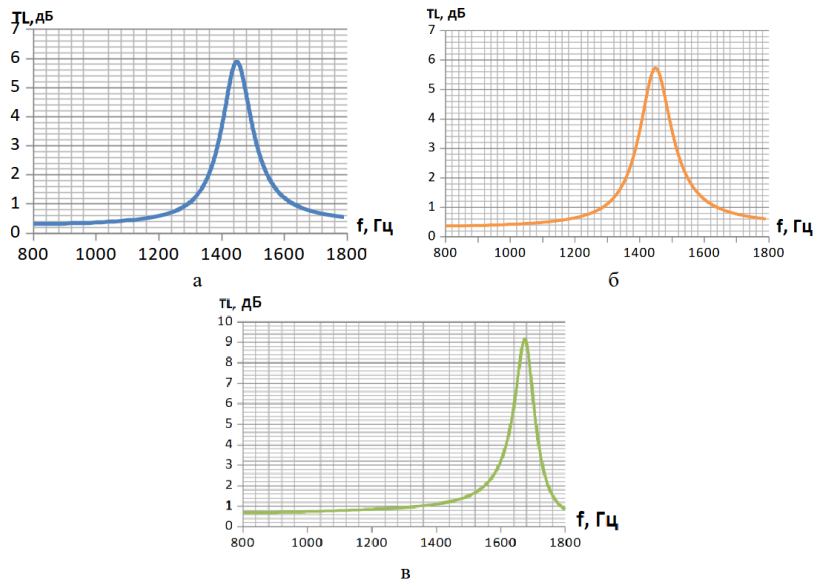


Рис. 5. Зависимости коэффициента потери акустического давления от частоты для перевернутой конусообразной ячейки, где а) $M = 0$; б) $M = 0,01$; в) $M = 0,05$

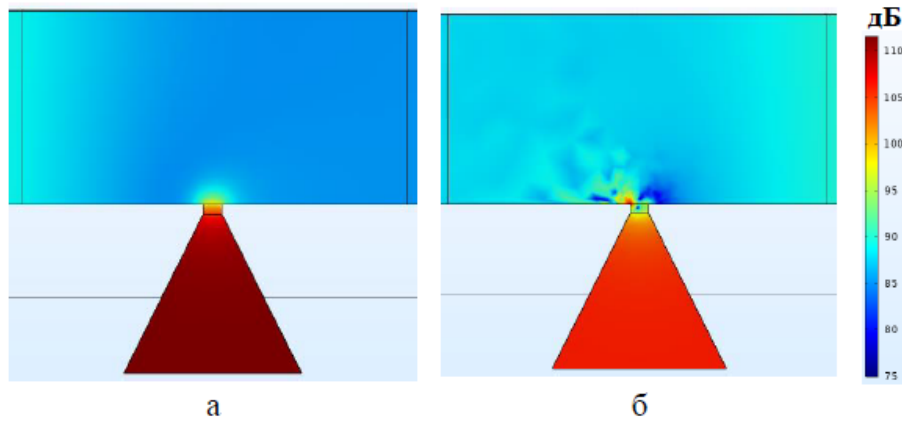


Рис. 6. Поле распределения акустического давления по продольному сечению модельного канала с конусообразной ячейкой при а) $M = 0$ и $M=0,01$ для резонансной частоты 1212 Гц и б) $M=0,05$ для 1368 Гц

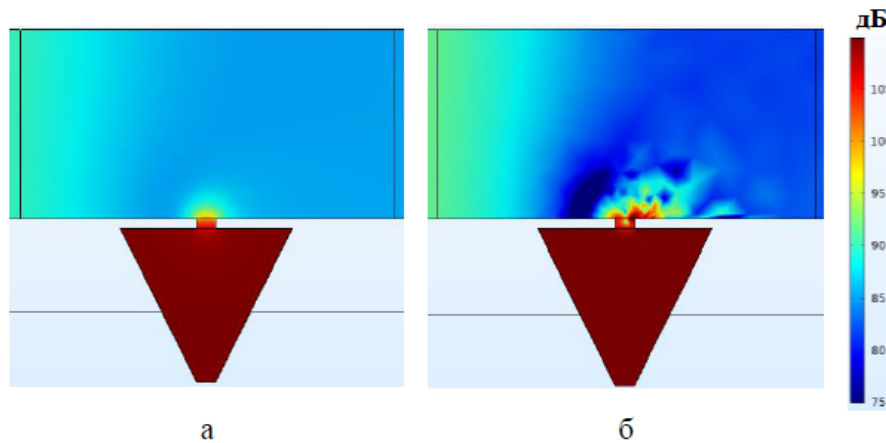


Рис. 7. Поле распределения акустического давления по продольному сечению модельного канала с обратной конусообразной ячейкой при а) $M = 0$ и $M=0,01$ для резонансной частоты 1448 Гц и б) $M=0,05$ для 1674 Гц

Анализ зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты для конусообразной ячейки выявил, что резонансная частота ячейки при $M = 0$ (без потока) составляет 1212 Гц при $TL = 6,14$ дБ. При увеличении числа Маха с 0 до 0,01 резонансная частота ячейки составляет 1213 Гц при $TL = 5,96$ дБ. При скорости потока $M = 0,05$ резонансная частота ячейки увеличивается на 155 Гц при уменьшении коэффициента потери акустического давления на $TL = 2,42$ дБ.

Анализ зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты для перевернутой конусообразной ячейки выявил, что резонансная частота ячейки при $M = 0$ (без потока) составляет 1448 Гц при $TL = 5,88$ дБ. При увеличении скорости потока с 0 до 0,01 Маха резонансная частота ячейки составляет 1449 Гц при $TL = 5,72$ дБ. При скорости потока $M = 0,05$ резонансная частота ячейки увеличивается на 225 Гц с увеличением коэффициента потери акустического давления на $TL = 3,43$ дБ.

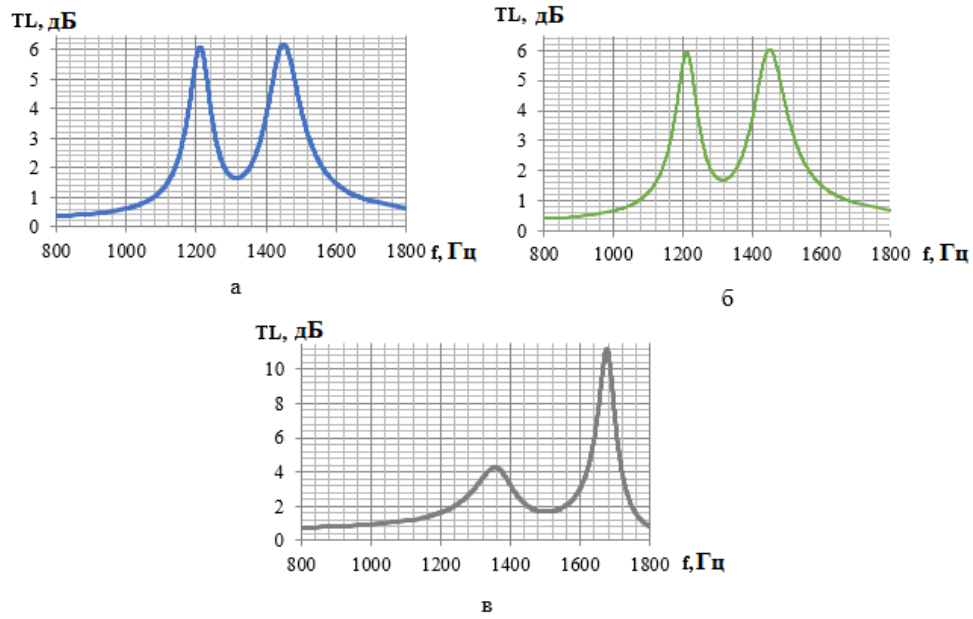


Рис. 8. Зависимости коэффициента потери акустического давления от частоты пары взаимно перевернутых ячеек, где а) $M = 0$; б) $M = 0,01$; в) $M = 0,05$

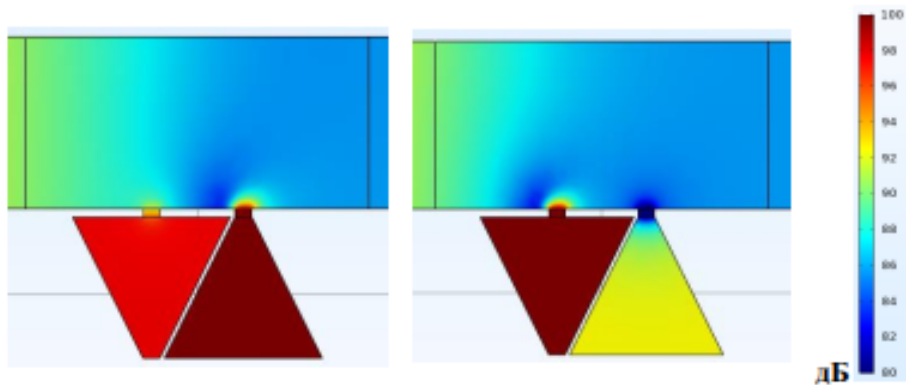


Рис. 9. Поле распределения акустического давления по продольному сечению модельного канала с взаимно перевернутыми конусами при $M = 0$ и $M = 0,01$ при резонансной частоте, где а) 1220 Гц, б) 1470 Гц

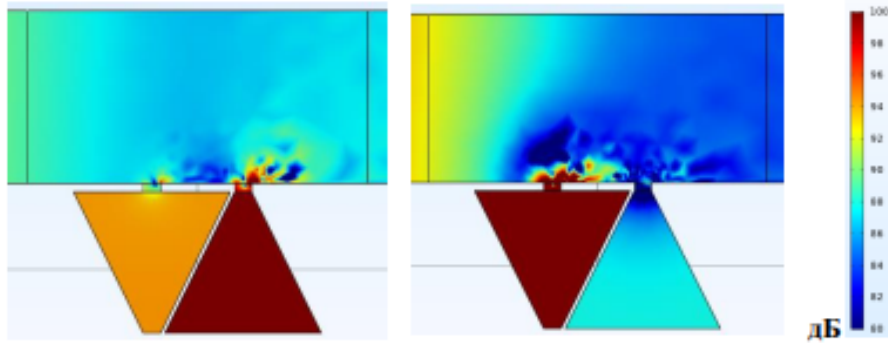


Рис. 10. Поле распределения акустического давления по продольному сечению модельного канала с взаимно перевернутыми конусами при $M = 0,05$ при резонансной частоте, где а) 1220 Гц, б) 1470 Гц

Анализ полученных результатов показал, что при численном расчете ЗПК, состоящей из взаимно перевернутых конусов, наблюдается два пика, каждый из пиков соответствует резонансной частоте одной из ячеек (конус или перевернутый конус). Обнаружено, что для ЗПК на основе взаимно перевернутых конусов при увеличении числа Маха с 0 до 0,01 не наблюдается значительное изменение зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты. При увеличении числа Маха с 0,01 до 0,05 коэффициент падения акустического давления уменьшается на 1,8 дБ с увеличением резонансной частоты на 150 Гц на первой резонансной частоте (коническая ячейка), а для второй резонансной частоты (перевернутая коническая ячейка) происходит увеличение TL_{max} на 11,5 дБ с увеличением резонансной частоты на 240 Гц. Выявлено, что при совместной работе пары взаимно перевернутых ячеек повышается коэффициент потери акустического давления для перевернутой конусообразной ячейки (второй пик).

По результатам анализа распределения акустических волн по продольным сечениям резонатора было выявлено, что волны, входящие в канал, за счет двойных проходов меняют свою фазу и гасят излучающую. В этом случае происходит взаимодействие резонансной ячейки с основной волной канала, что приводит к образованию четкой граничной линии, направленной в сторону основного звукового потока. В результате такого взаимодействия происходит снижение акустического сопротивления набегающего потока. При наличии потока в районе горловины наблюдается рост акустической эффективности резонатора из-за изменения частоты набегающей волны в пограничном слое.

Проведено сравнение коэффициента потери акустического давления пары взаимно перевернутых конусообразных ячеек и пары сотовых ячеек. На рисунке 9 представлен график зависимости коэффициента потери акустического давления от частоты для пары сотовых ячеек.

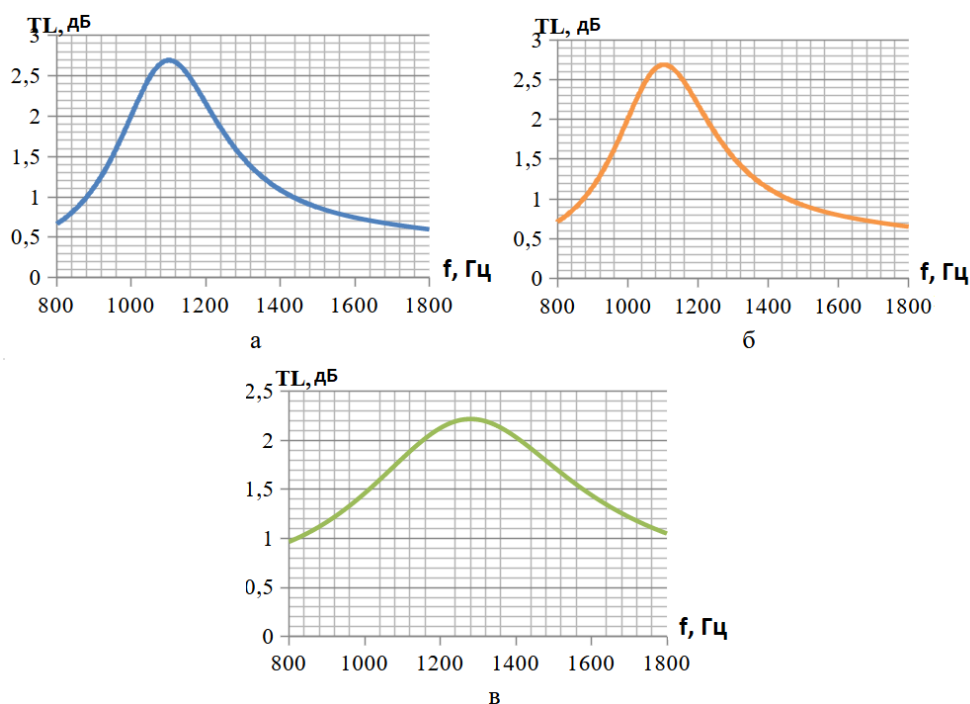


Рис. 11. Зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты для пары сотовых ячеек: а) $M = 0$; б) $M = 0,01$; в) $M = 0,05$

Анализ зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты для двух сотовых ячеек выявил, что совместная резонансная частота ячеек при $M = 0$ (без потока) составляет 1102 Гц при $TL = 2,69$ дБ. При увеличении скорости потока с 0 до 0,01 Маха совместная резонансная частота ячеек остается неизменной 1103 Гц при $TL = 2,68$ дБ. При скорости потока $M = 0,05$ совместная резонансная частота ячеек увеличивается на 1770 Гц при уменьшении коэффициента потери акустического давления на $TL = 0,47$ дБ.

Выявлено, что звукопоглощающие конструкции на основе взаимно перевернутых конусов являются акустически эффективнее по сравнению с ЗПК с сотовыми ячейками.

Заключение

В рамках выполненных исследований сформулирована физическая и математическая модель по расчету эффективных акустических характеристик ячеек ЗПК (резонаторов Гельмгольца) на основе взаимно перевернутых конусов, учитывающих пограничный слой в районе резонаторов и диссипацию энергии при наличии потока.

По результатам проведенных вычислительных экспериментов выявлены основные механизмы снижения интенсивности акустической волны за счет взаимодействия с взаимно перевернутыми конусообразными резонаторами.

Обнаружено, что при увеличении скорости потока с $M = 0,01$ до $M = 0,05$ наблюдается изменение зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты. На первой резонансной частоте при увеличении числа Маха с 0,01 до 0,05 коэффициента потери акустического давления уменьшается на 33% с увеличением резонансной частоты на 13%. На второй резонансной частоте при увеличении числа Маха с 0,01 до 0,05 коэффициента потери акустического давления увеличивается на 45% с увеличением резонансной частоты на 13%.

На следующем этапе работы планируется провести исследования влияния больших скоростей потока, применительных к авиационным конструкциям.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке государственного задания (проект No. FSNM-2023-0006).

Список литературы

1. Jones M.G., Howerton B. M., Ayle E. Evaluation of parallel-element, variable-impedance, broadband acoustic liner concepts // AIAA Paper. – 2012. - 2012-2194.
2. Nark D.M., Jones M. G., Sutliff D. L. Further Development and Assessment of a Broadband Liner Optimization Process // AIAA Paper. – 2016. - 2016-2784.
3. Jones M.G., Watson W.R., Nark D.M., Howerton B.M. Evaluation of a Variable-Impedance Ceramic Matrix Composite Acoustic Liner // AIAA Paper. – 2014. - 2014-3352.
4. Dannemann M, Kucher M, Kunze E, Modler N, Knobloch K, Enghardt L, Sarradj E, Höschler K. Experimental study of advanced Helmholtz resonator liners with increased acoustic performance by utilising material damping effects. Appl Sci 2018;8:1923–4.
5. Xu M, Selamet A, Kim H. Dual Helmholtz resonator. Appl Acoust 2010;71:822–9.
6. Захаров А.Г., Аношкин А.Н., Паньков А.А., Писарев П.В. Акустические резонансные характеристики двух и трехслойных сотовых звукопоглощающих панелей // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 46. – С. 144-159.
7. Соболев А.Ф., Ушаков В.Г., Филиппова Р.Д. Звукопоглощающие конструкции гомогенного типа для каналов авиационных двигателей // Акустический журнал. – 2009. – №6 (55). – С. 749-759.
8. Евстигнеев А.А., Ланшин А.И., Почкин Я.С., Солонин В.И., Халецкий Ю.Д. Проблема шума перспективных ТРДД для дальнемагистральных самолетов // Авиационные двигатели. – 2022. – № 2(15). – С. 27-40.
9. Цыплухина Ю.В., Манченко Е.В. Воздействие авиационного шума на здоровье населения // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2016. – № 1-1(7). – С. 356-360.
10. Соболев А.Ф. Полуэмпирическая теория однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций с лицевой перфорированной панелью // Акустический журнал. – 2007. – № 6(53). – С. 861-872.
11. Аношкин А.Н., Захаров А.Г., Городкова Н.А., Чурсин В.А. Расчетно-экспериментальные исследования резонансных многослойных звукопоглощающих конструкций // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. - №1. – С. 5-20.
12. Писарев П.В., Аношкин А.Н., Ахунзянова К.А. Исследование взаимовлияния ячеек разных форм на нелинейных режимах работы // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2020. - № 60. – С. 72-79.
13. Selamet A., Lee I. Helmholtz resonator with extended neck // J. Acoust. Soc. Am. – 2003. – № 113(4). – pp. 1975-1985.
14. Liu F., Horowitz F.S., Nishida T., Cattafesta L., Sheplak M. A multiple degree of freedom electromechanical Helmholtz resonator // J. Acoust. Soc. Am. – 2007. – № 122(1). – pp. 291-301.
15. Шульдешов Е.М., Краев И.Д., Образцова Е.П. Материалы для звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей (обзор) // Труды ВИАМ. – 2021. - №7(101). – С. 59-72.
16. Pisarev P.V., Akhunzianova K.A. Influence of the shape of the sound-absorbing construction cells on their acoustic efficiency in the linear and nonlinear operation modes //

AIP Conference Proceedings : 28th Russian Conference on Mathematical Modelling in Natural Sciences, RuMoNaS 2019, Perm, 02–05 октября 2019 года. Vol. 2216. – Perm: American Institute of Physics Inc., 2020. – P. 050006. – DOI 10.1063/5.0004084.

References

1. Jones M.G., Howerton B. M., Ayle E. Evaluation of parallel-element, variable-impedance, broadband acoustic liner concepts // AIAA Paper. – 2012. - 2012-2194.
2. Nark D.M., Jones M. G., Sutliff D. L. Further Development and Assessment of a Broadband Liner Optimization Process // AIAA Paper. – 2016. - 2016-2784.
3. Jones M.G., Watson W.R., Nark D.M., Howerton B.M. Evaluation of a Variable-Impedance Ceramic Matrix Composite Acoustic Liner // AIAA Paper. – 2014. - 2014-3352.
4. Dannemann M, Kucher M, Kunze E, Modler N, Knobloch K, Enghardt L, Sarradj E, Höschler K. Experimental study of advanced Helmholtz resonator liners with increased acoustic performance by utilising material damping effects. Appl Sci 2018;8:1923–4.
5. Xu M, Selamat A, Kim H. Dual Helmholtz resonator. Appl Acoust 2010;71:822–9.
6. Zakharov A.G., Anoshkin A.N., Pan'kov A.A., Pisarev P.V. Acoustic resonant characteristics of two - and three-layered cellular sound absorbing panels // PNRPU Aerospace Engineering Bulletin. – 2016. – № 46. – pp. 144-158.
7. Sobolev A.F., Ushakov V.G., Filipova R.D. Homogeneous sound-absorbing structures for aircraft engine ducts // Acoust. Phys. 2009. – № 6(55). – pp. 749-759.
8. Evstigneev A.A., Lanshin A.I., Pochkin YA.S., Solonin V.I., Haleckij YU.D. Problema shuma perspektivnyh TRDD dlya dal'nemagistral'nyh samoletov / // Aviacionnye dvigateli. – 2022. – № 2(15). – p. 27-40.
9. Cypluhina YU.V., Manchenko E.V. Vozdejstvie aviacionnogo shuma na zdorov'e naseleniya // Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij. – 2016. – № 1-1(7). – p. 356-360.
10. Sobolev A.F. A semiempirical theory of a one-layer cellular sound-absorbing lining with a perforated face panel // Acoust. Journal. – 2007. - № 6(53). – pp. 762-771.
11. Anoshkin A.N., Zakharov A.G., Gorodkova N.A., Chursin V.A. Computational and experimental studies of resonance sound-absorbing multilayer structures // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2015. – № 1. – pp. 5-20.
12. Pisarev P.V., Anoshkin A.N., Akhuzianova K.A. Research of the different shapes cells mutual influence in non-linear operating modes // Vestnik PNRPU. Aerocosmicheskaya tehnika. – 2020. – № 60. – pp. 72-79.
13. Selamat A., Lee I. Helmholtz resonator with extended neck // J. Acoust. Soc. Am. – 2003. – № 113(4). – pp. 1975-1985.
14. Liu F., Horowitz F.S., Nishida T., Cattafesta L., Sheplak M. A multiple degree of freedom electromechanical Helmholtz resonator // J. Acoust. Soc. Am. – 2007. – № 122(1). – pp. 291-301.
15. Shuldeshov E.M., Kraev I.D., Obratsova E.P. Materials for sound-proof designs of aircraft engines (review) // Trudy VIAM. - 2021. - №7(101). – pp. 59-72.
16. Pisarev P.V., Akhuzianova K.A. Influence of the shape of the sound-absorbing construction cells on their acoustic efficiency in the linear and nonlinear operation modes // AIP Conference Proceedings : 28th Russian Conference on Mathematical Modelling in Natural Sciences, RuMoNaS 2019, Perm, 02–05 октября 2019 года. Vol. 2216. – Perm: American Institute of Physics Inc., 2020. – P. 050006. – DOI 10.1063/5.0004084.