

Научная статья
УДК 629.7.021
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182565>

РАЗРАБОТКА ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ С РАЗНОВЫСОТНЫМИ И СОСТАВНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Павел Викторович Писарев¹, Карина Алексеевна Ахунзянова²✉

^{1, 2} Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ),
Пермь, Россия

¹ pisarev85@live.ru

² karina-maksimova0402@yandex.ru✉

Аннотация. Проведены численные эксперименты по моделированию распространения акустических волн в модельном канале, оснащённом разновысотными и составными резонаторами различного объема. Выявлены эффективные сочетания призматических резонаторов. Выявленные зависимости могут быть использованы при разработке ЗПК для авиационного двигателя. Разработаны схемы и рекомендации по размещению разновысотных и составных резонаторов, которые позволяют увеличить число степеней свободы и акустическую эффективность резонансных звукопоглощающих конструкций. Выполненные исследования позволили выявить закономерности акустических процессов в модельных каналах и разработать однослойные составные звукопоглощающие конструкции, способные работать на нескольких резонансных частотах.

Ключевые слова: звукопоглощающие конструкции, составные резонаторы, облицовка силовых установок самолетов, акустическая эффективность

Финансирование: работа выполнена в ПНИПУ при поддержке государственного задания, проект № FSNM-2023-0006.

Для цитирования: Писарев П.В., Ахунзянова К.А. Разработка звукопоглощающей конструкции с разновысотными и составными резонаторами для авиационных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 3. С. 106–116. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182565>

Original article

DEVELOPING SOUND-ABSORBING STRUCTURE WITH VARIOUS-HEIGHT AND COMPOSITE RESONATORS FOR AIRCRAFT ENGINES

Pavel V. Pisarev¹, Karina A. Akhunzianova²✉

^{1, 2} Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russia

¹ pisarev85@live.ru

² karina-maksimova0402@yandex.ru✉

Abstract

The development of civil aviation and air transportation market, which is an indicator of the economic growth of cities and regions, is rapidly upgrowing strength in the XXI century. The International Civil Aviation Organization

(ICAO) has highlighted air transport ecology as the second most pressing issue, after flight safety. ICAO is constantly tightening International Standards for aircraft noise on the terrain, normalizing its level at the takeoff and landing modes, which compels aircraft manufacturers to develop new technologies for the aircraft noise reduction. Resonant sound-absorbing structures (SAS) are commonly employed to reduce the noise terrain by tuning them to a specific frequency range of the SAS operation. These sound-absorbing structures are commonly installed on the inner surface of the aircraft engine air intake to reduce the noise propagation to the front hemisphere, as well as on the walls of the engine outer loop to reduce noise propagation to the rear hemisphere.

The object of the study is sound-absorbing structures that employ Helmholtz resonators with prismatic cells, which operate in a broad range of frequencies.

The study involves the development of sound-absorbing structures with different heights and composite resonators. The purpose of the presented research consists in developing schemes and recommendations on the placement of resonators with different configurations in sound-absorbing structures operating over a broad range of frequencies.

The authors conducted computational experiments on studying mutual interaction of cells with various configurations. Computation of damping effect value of the Helmholtz resonators while their joint operation was being executed based on numerical solution of the Helmholtz equation. Mathematical model for the acoustic efficiency assessing of the sound absorbing structures cells while their joint operation was formulated by the results of the accomplished studies.

The authors developed the schemes of mutual arrangement of resonators with two degrees of freedom. Compared to conventional structures, the sound absorbing structures developed in this study allow reducing mutual effect of closely spaced resonators of various configurations at the joint frequency, as well as improving the broadbandness of the sound absorbing structures. The study reveals regularities of the sound absorption coefficient of resonators in the sound-absorbing structures depending on the cells with various configurations arrangement. It was found that at the joint frequency the efficiency of the basic resonator and the group broadbandness increase while resonators of various volume joint operation, as well as the largest value of the acoustic pressure loss coefficient for the composite resonators were being observed.

The results of the study will allow establishing regularities of acoustic fields distribution in the model channel at various configuration in placing and shapes of the honeycomb fillers and revealing notional factors affecting the acoustic efficiency of the sound absorbing structures. The obtained results will allow developing new technological schemes of the sound absorbing structures not only more effective, but more compact and light as well with better strength characteristics due to the multilayer structure renunciation. These multilayer structures may be applied for the prospective aviation engines meet the requirements of the International Civil Aviation Organization (ICAO).

The next stage of research involves conducting laboratory tests of the developed composite sound-absorbing structures.

Keywords: sound-absorbing structures, composite resonators, aircraft power plant cladding, acoustic efficiency

Funding: the work was accomplished at Perm National Research University and financed by the State Assignment, Project No. FSNM-2023-0006

For citation: Pisarev P.V., Akhunzianova K.A. Developing Sound-Absorbing Structure with Various-Height and Composite Resonators for Aircraft Engines. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 3, pp. 106–116. URL: /<https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182565>

Введение

В настоящее время соответствие воздушных судов требованиям по уровню авиационного шума на местности является одним из ключевых показателей, занимающим второе место после обеспечения безопасности полетов [1–4].

Основным источником шума являются турбореактивные двухконтурные двигатели (ТРДД), которые применяются на большинстве современных ВС [5, 6]. ТРДД состоят из множества узлов (таких как вентилятор, компрессоры высокого и низкого давления, камера сгорания, турбины),

каждый из которых генерирует шум на различных частотах [6–8], как во время взлета и посадки, так и во время полета на крейсерской скорости. Шум от двигателей воздействует на людей как на земле, так и внутри самолета.

На сегодняшний день известно, что для снижения шума в ТРДД традиционно используют многослойные ЗПК (двух- и трехслойные), настроенные на различные частоты [9–12]. Однако применение многослойных конструкций приводит к увеличению занимаемого ими объема, массы конструкции, себестоимости и технологичности [13, 14].

В связи с этим становится актуальной задача создания высокоэффективных широкополосных ЗПК для перспективных авиационных двигателей, требующих комплексного учета многих факторов, например конструктивных параметров ЗПК, параметров внешнего воздействия, характерных для эксплуатации ЗПК в каналах авиационных двигателей, влияние масштаба образцов ЗПК на акустические свойства.

Одно из возможных направлений решения данной задачи заключается в разработке новой конструкции, состоящей из разновысотных и составных резонаторов. Такая конструкция будет обладать большим числом степеней свободы по сравнению с однослойными конструкциями, что позволит значительно расширить полосу звукопоглощения.

В настоящее время известны работы [15–19], в которых рассмотрены различные модификации резонаторов в составе ЗПК. Такие конструктивные особенности, как резонаторы различной конфигурации [15], резонаторы со спиральной и удлиненной горловиной [16, 17], резонаторы со встроенными в горловину пьезоэлектрическими элементами [18], парные резонаторы, в которых мембрана использовалась в качестве общей боковой стенки для соединения двух резонаторных полостей [19], позволили повысить широкополосность и акустическую эффективность конструкции. Однако перечисленные методы являются трудно-реализуемыми в связи с тем, что нет подходящих технологий серийного изготовления предложенных резонаторов.

В рамках настоящей работы предложена концепция составной ЗПК. Конструкция является однослойной и состоит из регулярно повторяющихся разновысотных и комбинированных призматических резонаторов, настроенных на отличающиеся друг от друга частоты. В процессе исследования осуществляется численный расчет акустической эффективности группы резонаторов и их взаимного расположения в составе облицовки силовых установок самолетов.

Цель настоящего исследования заключена в выявлении закономерностей акустических процессов в модельных каналах и последующей разработке однослойных составных звукопоглощающих конструкций для авиационных двигателей нового поколения.

Постановка задачи численного моделирования распространения звуковой волны в канале с резонаторами

Для проведения ряда вычислительных экспериментов были построены геометрические модели, которые можно разделить на три группы: А1-3, В1-3

и В1,2. Все геометрические модели содержат канал и присоединенные посередине канала свободные объемы резонаторов. Кроме этого, все модели группы содержат «базовый» призматический резонатор со следующими геометрическими характеристиками: высота резонатора – 30 мм, длина стороны гексагона – 4 мм, диаметр и высота горла – 1 мм.

На рис. 1 представлена размерная схема геометрической модели, где: 1 – канал конечной длины, квадратного сечения, по центру на одной из продольных граней расположен резонатор 2 призматической формы («базовый» вариант А0), соединенный с каналом «узким» горлом 3 цилиндрической формы.

Общий вид геометрических моделей группы А1-3 представлен на рис. 2. Модели содержат два «базовых» призматических резонатора. Расстояние между осевыми линиями (Δl), проходящими через центр горла резонаторов, принималось равным 9, 20 и 45 мм соответственно для трех расчетных случаев.

Геометрические модели В1-3 (рис. 3) содержат свободные объемы резонаторов, состоящих из «базового» призматического резонатора (А0), а также «вспомогательного» резонатора, который

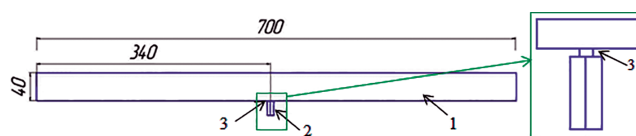


Рис. 1. Геометрические характеристики «базовой» модели

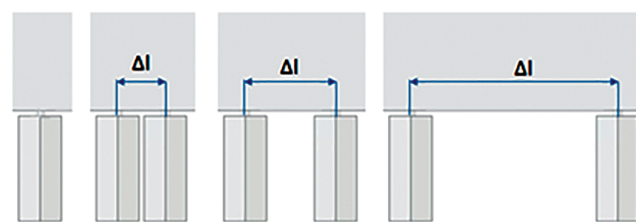


Рис. 2. Общий вид геометрических моделей А1-3, где а – «базовый» призматический резонатор (А0); б – расстояние между резонаторами 9 мм; в – расстояние между резонаторами 20 мм; г – расстояние между резонаторами 45 мм

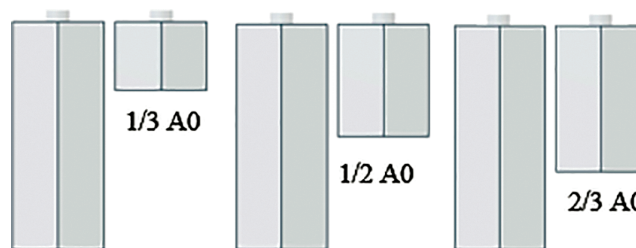


Рис. 3. Общий вид геометрических моделей В1-3

меньше «базового» по объему на: 30%, 50% и 70% соответственно.

Геометрическая модель В1 (рис. 4,а) содержит свободные объемы резонаторов, состоящих из «базового» призматического резонатора (А0), а также «вспомогательного» резонатора, который меньше «базового» по объему на 70%. Геометрическая модель В2 (рис. 4,б) содержит свободные объемы резонаторов, состоящих из «базового» призматического резонатора (А0), а также «вспомогательных» составных резонаторов, для которых приняты соотношения объемов (относительно «базового» объема) 2/3 А0 для верхнего и 1/3 А0 для нижнего резонатора.

Для лучшей сходимости решения и снижения погрешностей получаемых результатов применялась расчетная сетка, ячейки которой имеют форму, близкую к форме равностороннего тетраэдра. Максимальный размер элемента определялся как $N_{max} = 343[m/s]/6[kГц]/10 = 0,0057$ м, минимальный размер элемента принимался $N_{min} = 0,001$ м, общее количество элементов составило 900 тысяч элементов. Помимо прочего, при измельчении сетки не допускались резкие отличия геометрических размеров соседних ячеек – линейные размеры соседних ячеек не отличаются более чем в два раза.

При начальном построении генерировалась первичная расчетная сетка. Затем определялись параметры измельчения сетки, в соответствии с которыми происходит измельчение элементов пер-

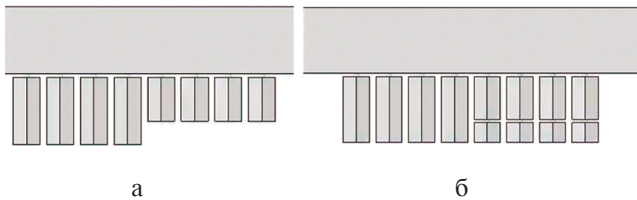


Рис. 4. Общий вид геометрических моделей, где а – В1, б – В2

вичной сетки до нужной степени дискретизации в областях высоких градиентов переменных. Определение параметров первичной сетки осуществляется в редакторе расчетной сетки в программном комплексе Comsol.

Учитывалось, что численный эксперимент считается сошедшимся в том случае, когда результат численного моделирования (по параметру коэффициента потери акустического давления) не изменяется при дальнейшем измельчении конечно-элементной сетки (рис. 5).

По результатам исследования влияния размера расчетного элемента на величину коэффициента потери акустического давления было выявлено, что TL (коэффициент потери акустического давления) выходит на постоянное значение при значении $N_{max} = 0,005$ м. Также при построении расчетной сетки проводилась адаптация в областях высоких градиентов переменных – области горловины резонаторов.

$$-\nabla \cdot \left(\frac{\nabla P}{\rho_0} \right) - \frac{\omega^2}{\rho_0 c^2} P = 0, \quad (1)$$

где P – давление в расчетной области, $\omega = 2\pi v$ – круговая частота, ρ_0 – плотность воздуха, c – скорость звука в среде, v – частота сигнала на входе.

Схема задаваемых в численном расчете граничных условий приведена на рис. 6.

1. Волна на входе задавалась в виде гармонической волны давления с амплитудой $Pa = 10000$ Па:

$$n \cdot \left(\frac{\nabla P}{\rho_0} \right) = \frac{i\omega}{\rho_0 c} P - \frac{ic}{2\rho_0 \omega} P_a. \quad (2)$$

2. Волна на выходе:

$$n \cdot \left(\frac{\nabla P}{\rho_0} \right) = \frac{i\omega}{\rho_0 c} P. \quad (3)$$

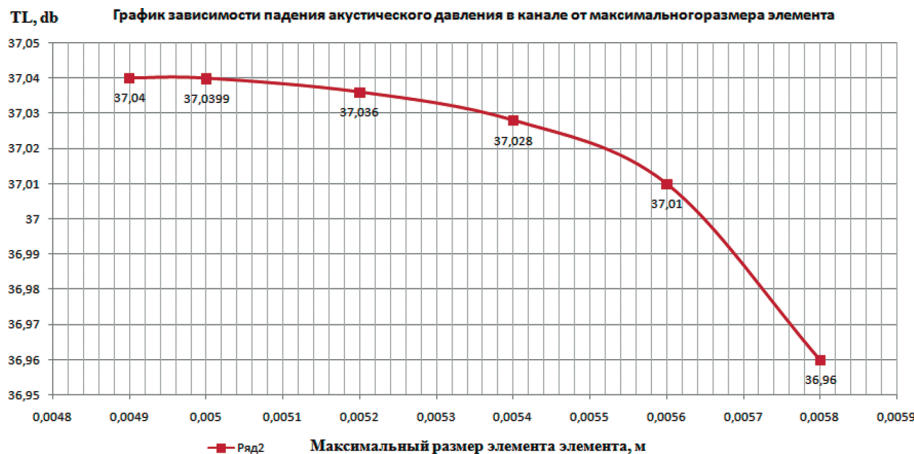


Рис. 5. График зависимости падения акустического давления в канале от максимального размера элемента

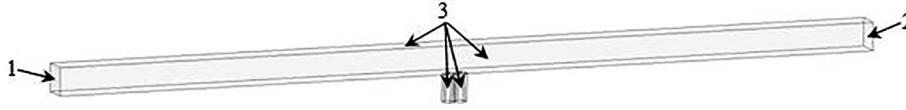


Рис. 6. Схема граничных условий, где 1 – волна на входе; 2 – волна на выходе; 3 – жесткая стенка

3. Граничное условие стенка (жесткая стенка):

$$n \cdot \left(\frac{\nabla P}{\rho_0} \right) = 0. \tag{4}$$

Определение коэффициента потери акустического давления:

$$TL = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right), \tag{5}$$

где $P_{in} = \int \partial\Omega \frac{P^2}{2\rho_0 c_s} dA$; $P_{out} = \int \partial\Omega \frac{|P_c|^2}{2\rho_0 c_s} dA$.

Исследование влияния расстояния между осевыми линиями, проходящими через центр горла резонаторов

По результатам вычислительных экспериментов были получены зависимости коэффициента потери акустического давления (*TL*) от частоты. На рис. 7 представлена зависимость для «базовой» геометрической модели.

Анализ зависимости показал, что резонансной частотой для данного резонатора является частота $\nu = 1769$ Гц, значение коэффициента потери акустического давления (*TL*) составило 37 дБ.

На рис. 8 представлено поле распределения акустического давления по продольному сечению модельного канала.

При рассмотрении результатов численных экспериментов, полученных для моделей группы А, было выявлено, что наибольшее значение коэффициента потери акустического давления (*TL*) наблюдается для пары резонаторов, расположенных на расстоянии друг от друга $\Delta l = 45$ мм, и составляет $TL_{max} = 60$ дБ при резонансной частоте 1769 Гц (рис. 9, в). В то же время минимальное значение коэффициента потери акустического давления (*TL*) наблюдается для пары резонаторов, расположенных на расстоянии друг от друга $\Delta l = 9$ мм, $TL_{min} = 17$ дБ при резонансной частоте 1775 Гц (рис. 9, а). Значение коэффициента потери акустического давления (*TL*) для пары резонаторов, расположенных на расстоянии друг от друга $\Delta l = 20$ мм, составило $TL_{min} = 34$ дБ при резонансной частоте 1767 Гц (рис. 9, б).

Анализ полей акустического давления, полученных в рамках вычислительных экспериментов, показал, что расчетные варианты с наибольшим коэффициентом потери акустического давления имеют характерную картину течения, как и для случаев с наименьшим коэффициентом потери (рис. 10).



Рис. 8. Поле распределения акустического давления

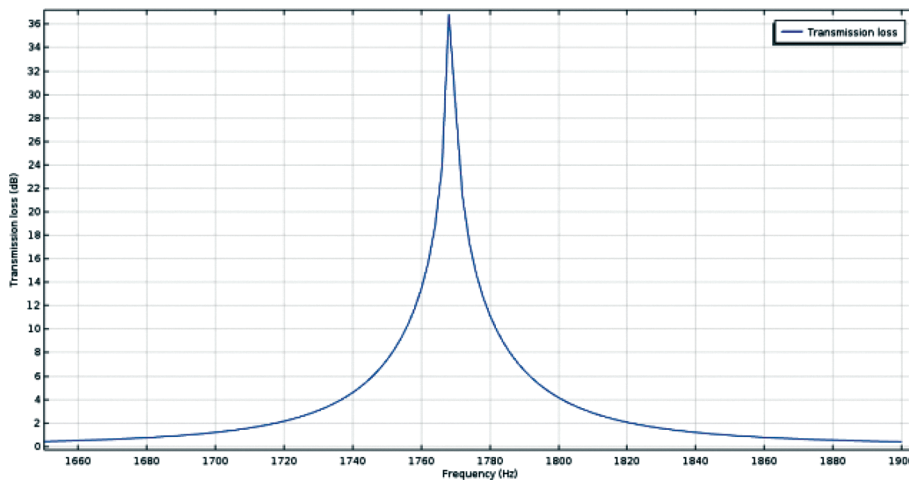
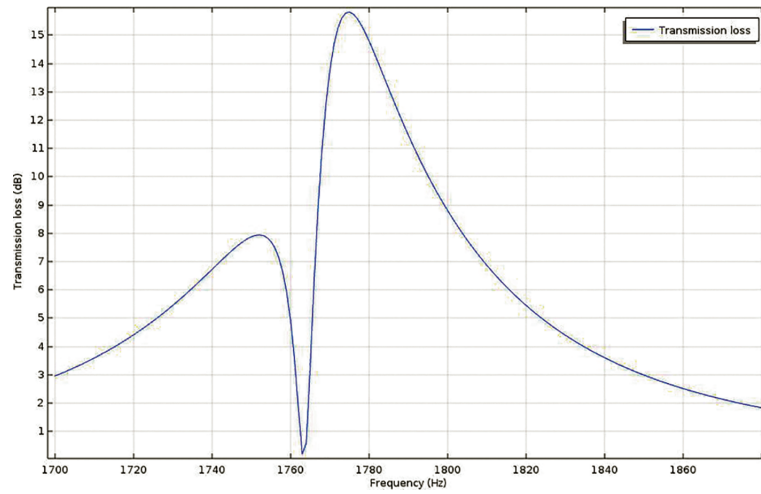
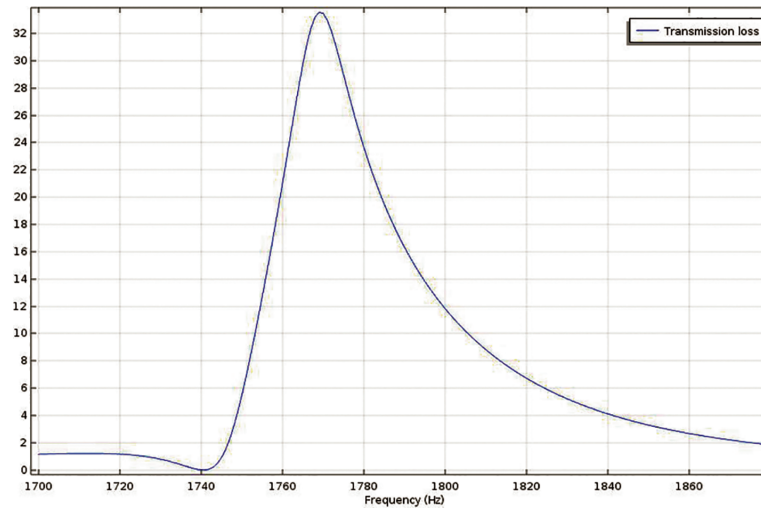


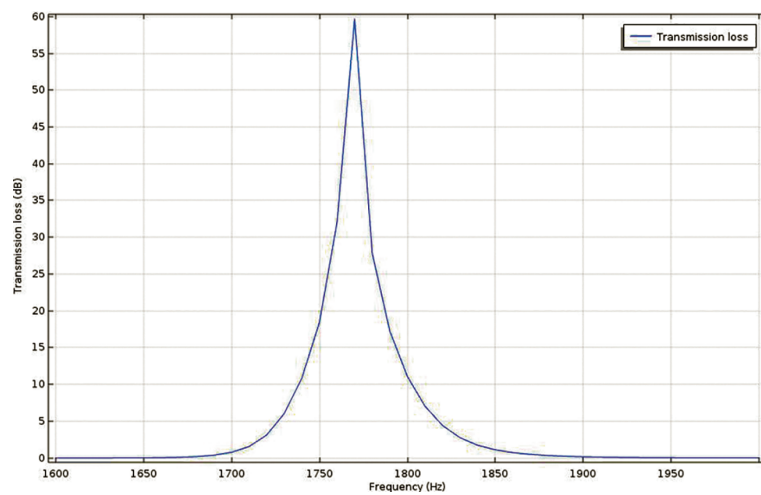
Рис. 7. Зависимости коэффициента потери акустического давления (*TL*) от частоты ν для «базовой» геометрической модели



a



б



в

Рис. 9. Зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты, где *a* – модель A1; *б* – модель A2; *в* – модель A3

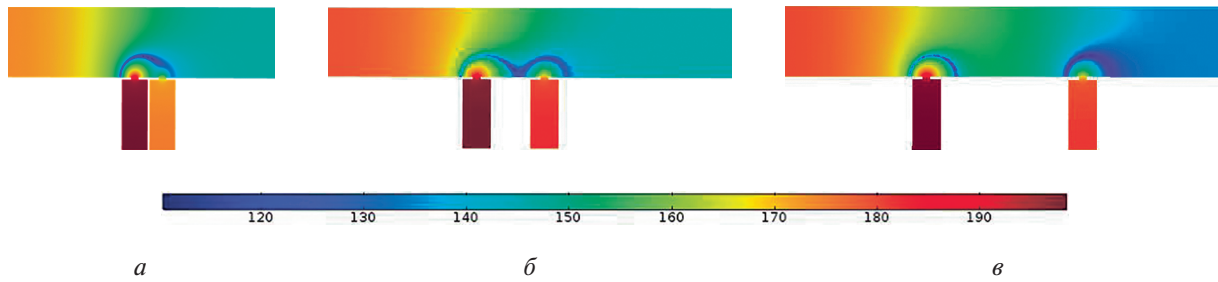


Рис. 10. Поля распределения акустического давления по продольному сечению модельного канала, где *a* – модель А1, *б* – модель А2, *в* – модель А3

Анализ полученных результатов выявил, что акустическая эффективность пары резонаторов, расположенных на расстоянии 9 мм, при совместной работе ниже на 20 дБ, чем у одиночного резонатора. При расстоянии 20 мм наблюдается снижение коэффициента потери акустического давления (*TL*) на 3 дБ по сравнению с результатами, полученными для одного резонатора. При расстоянии 45 мм наблюдается увеличение коэффициента потери акустического давления (*TL*) на 23 дБ по сравнению с результатами, полученными для одного резонатора. Таким образом, можно сделать вывод о том, что при совместной работе пары одинаковых резонаторов наблюдается взаимовлияние и в результате понижается акустическая эффективность, возникает необходимость в разработке таких сочетаний резонаторов, которые позволят уменьшить взаимовлияние резонаторов при их совместной частоте.

Также было обнаружено, что увеличение расстояния между резонаторами приводит к изменению (уменьшению) их совместной резонансной частоты. Так, например, при изменении расстояния от 9 до 45 мм происходит уменьшение резонансной частоты на 6 Гц.

Исследование взаимовлияния резонаторов призматической формы различного объема

По результатам вычислительных экспериментов для расчетных вариантов Б1-3 были получены зависимости коэффициента потери акустического давления (*TL*) от частоты, а также распределение полей акустического давления. При рассмотрении результатов, полученных для моделей Б1-3, выявлено, что наибольшее значение коэффициента потери акустического давления (*TL*) наблюдается для модели Б3 $TL_{max} = 38$ дБ при резонансной частоте 1773 Гц и $TL_{max} = 39$ дБ при резонансной частоте 2277 Гц (рис. 11).

При рассмотрении результатов, полученных для модели Б3, обнаружено незначительное (на 1 дБ) снижение коэффициента потери акустического давления второго резонатора, по сравнению с моделью А1 (разница 9 дБ). При этом с увеличением объема резонатора наблюдается понижение резонансной частоты. Значение коэффициента потери акустического давления составило для «базового» $TL_{max} = 34$ дБ при резонансной частоте 1786 Гц, и для второго резонатора $TL_{ma} = 37$ дБ при резонансной частоте Гц 2619 Гц (рис. 12).

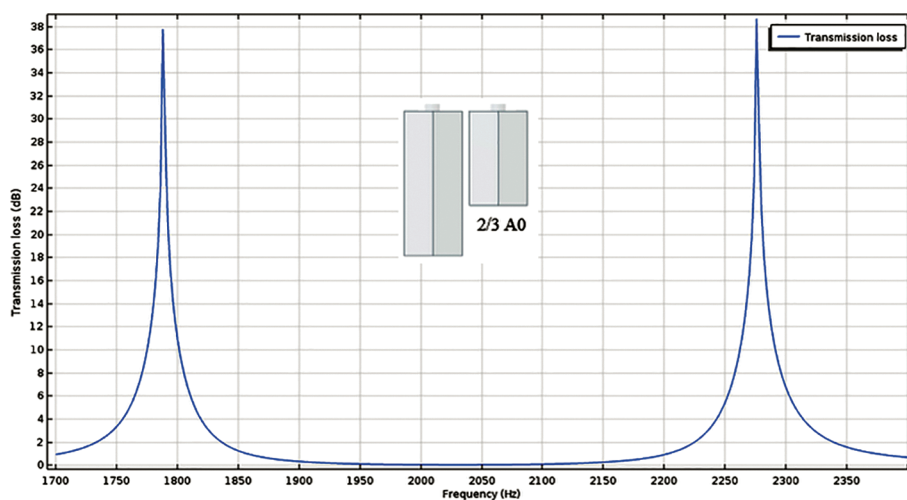


Рис. 11. Зависимости коэффициента потери акустического давления (*TL*) от частоты ν для расчетного варианта Б3

Наименьшее значение коэффициента потери акустического давления (TL), наблюдается для расчетного варианта Б2 и составляет $TL_{max}=36$ дБ при резонансной частоте 1783 Гц, и $TL_{max} = 34$ дБ при резонансной частоте 3431 Гц (рис. 13).

Сравнительный анализ результатов, полученных для резонаторов группы Б, показал, что наиболее предпочтительным является сочетание резонаторов Б3, при котором наблюдаются наибольшие значения коэффициента потери акустического давления.

Таким образом, разнообразие объемов и конфигураций резонаторов в составе композитной ЗПК может способствовать увеличению общей акустической эффективности благодаря синергетическому

взаимодействию между ними. Благодаря такой компоновке, помимо улучшения работоспособности «базовых» резонаторов, совместная работа резонаторов различного объема приводит к увеличению широкополосности группы. Таким образом, понимание и учет взаимосвязи и конфигурации резонаторов при их совместной работе является одним из ключевых аспектов при проектировании ЗПК и могут значительно повысить акустические характеристики конструкции в целом.

При разработке конструктивно технологической схемы звукопоглощающей конструкции опытного образца рекомендовано использование сочетания резонаторов Б3, случай сочетания базового резонатора и резонатора с объемом $2/3$ от базового.

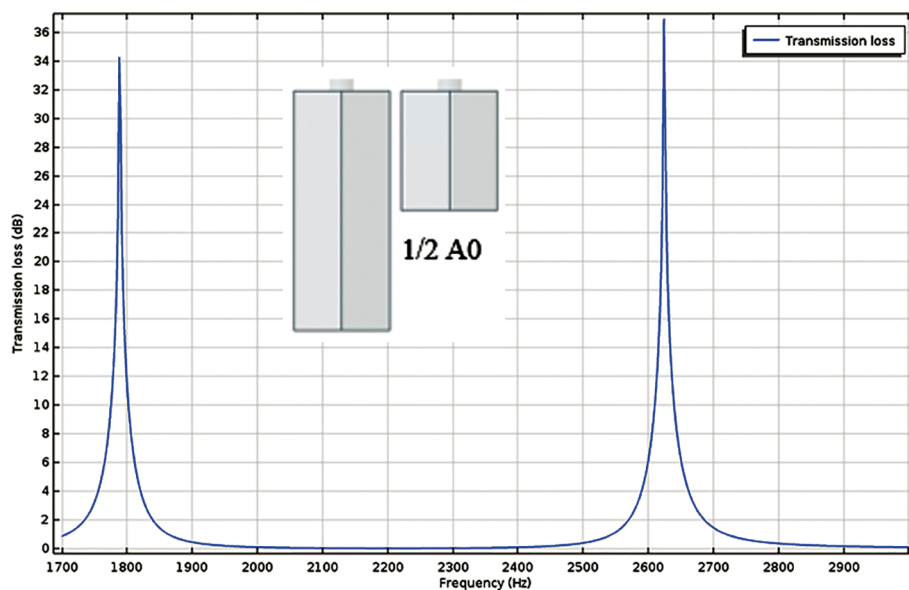


Рис. 12. Зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты ν для расчетного варианта Б1

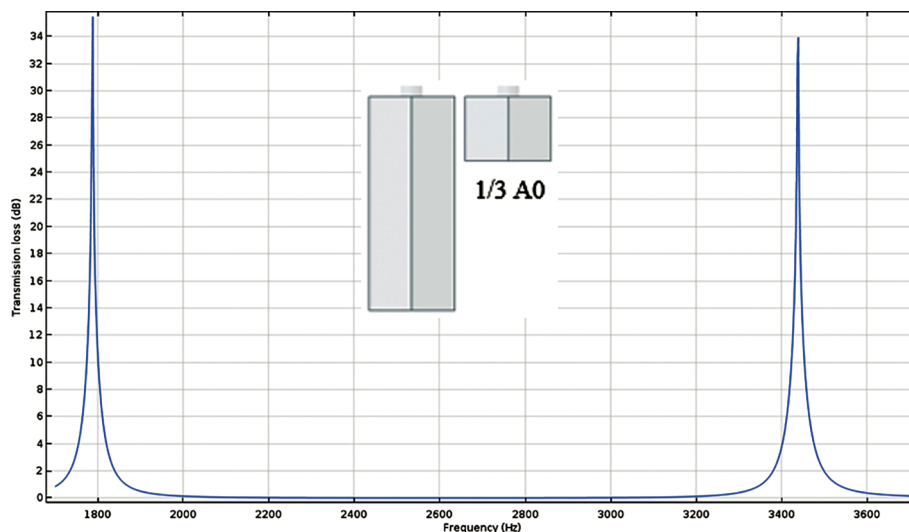


Рис. 13. Зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты ν для расчетного варианта Б2

Исследование взаимовлияния группы составных резонаторов призматической формы различного объема

Анализ результатов численных экспериментов, полученных для моделей группы В1,2 выявил, что наибольшее значение коэффициента потери акустического давления (*TL*) наблюдается для расчетного варианта В2. Максимальное значение коэффициента потери акустического давления для группы «базовых» резонаторов составило $TL_{max} = 52$ дБ при резонансной частоте $\nu = 1763$ Гц. Для группы вспомогательных резонаторов – $TL_{max} = 85$ дБ при резонансной частоте $\nu = 1787$ Гц (рис. 15).

Для модели В1 максимальное значение коэффициента потери акустического давления для группы «базовых» резонаторов составило $TL_{max} = 34$ дБ при резонансной частоте $\nu = 1787$ Гц. Для группы вспомогательных резонаторов – $TL_{max} = 60$ дБ при резонансной частоте $\nu = 2288$ Гц (рис. 14).

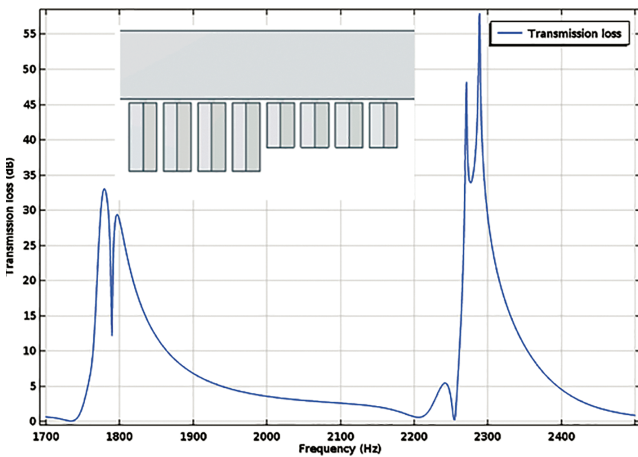


Рис. 14. Зависимости коэффициента потери акустического давления (*TL*) от частоты ν для расчетного варианта В1

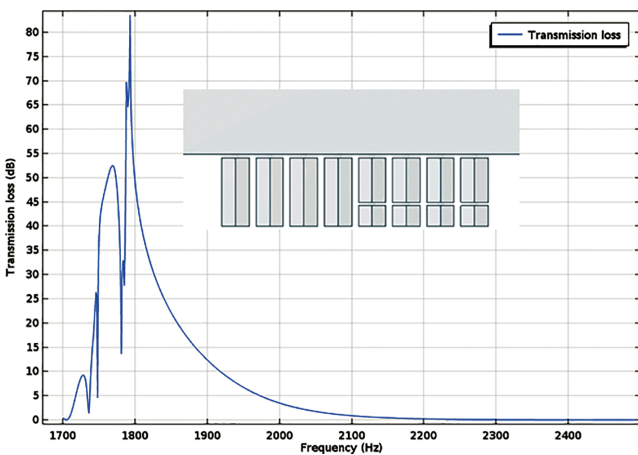


Рис. 15. Зависимости коэффициента потери акустического давления (*TL*) от частоты ν для расчетного варианта В2

Разработка звукопоглощающей конструкции с разновысотными и составными резонаторами для авиационных двигателей

По результатам исследований, выполненных в рамках настоящей работы, была разработана звукопоглощающая конструкция с разновысотными и составными резонаторами.

Звукопоглощающая конструкция состоит из нескольких соединенных между собой секций, каждая из которых содержит внутренний перфорированный и наружный несущие слои обшивки и размещенный между слоями наполнитель. Согласно предложенной концепции, в каждой секции несущие слои обшивки и наполнитель между ними выполнены как единое целое в виде отдельных резонаторов различной формы и/или объема, при этом секции выполнены с возможностью отсоединения друг от друга. Выполнение секций с возможностью отсоединения друг от друга позволяет составить звукопоглощающую панель с различным набором резонаторов. За счет использования комбинированных форм и схем размещения резонаторов значительным образом снижается взаимовлияние резонаторов и повышается эффективность совместной работы на широкой полосе частот. Кроме этого, резонаторы различных форм и/или объема могут быть установлены с чередованием по длине и ширине панели в различном порядке, определяющем тональный состав шума авиационного двигателя [20].

Выводы

По результатам выполненных исследований сформулирована математическая модель прогнозирования акустической эффективности резонаторов ЗПК при их совместной работе.

Проведены исследования акустических характеристик ЗПК с наполнителем различной высоты. Разработаны схемы взаимного расположения резонаторов с двумя степенями свободы. Разработанные схемы ЗПК, по сравнению с существующими ЗПК, позволяют уменьшить взаимовлияние близко расположенных резонаторов различной конфигурации при совместной работе, а также повысить широкополосность ЗПК.

Выявлены закономерности изменения коэффициента звукопоглощения резонаторов ЗПК в зависимости от схемы расположения резонаторов различной конфигурации. Обнаружено, что при совместной работе резонаторов различного объема повышается эффективность «базового» резонатора и широкополосность группы, а также наибольшее значение коэффициента потери акустического давления для составных резонаторов наблюдается на совместной частоте. Выявленные закономерности

могут быть использованы для выбора конструкции ЗПК.

Разработана однослойная составная звукопоглощающая конструкция, которая открывает новые возможности для сокращения шумовой нагрузки на окружающую среду и обеспечивает перспективное решение при создании более тихих авиационных двигателей.

Список источников

1. *Фиев К.П.* Мониторинг авиационного шума и выявление типов воздушных судов, оказывающих воздействие на селитебную территорию, вблизи аэропорта // *Noise Theory and Practice*. 2021. Т. 7. № 2(24). С. 139–150.
2. *Мошков П.А., Василенков Д.А., Рубановский В.В., Строганов А.И.* Локализация источников шума в гермокабине самолета RRJ-95 сферической микрофонной решеткой. Часть 1. Кабина экипажа // *Вестник Московского авиационного института*. 2020. Т. 27. № 2. С. 37–51. DOI: 10.34759/vst-2020-2-37-51
3. *Мошков П.А., Василенков Д.А., Рубановский В.В., Строганов А.И.* Локализация источников шума в гермокабине самолета RRJ-95 сферической микрофонной решеткой. Часть 2. Пассажирский салон // *Вестник Московского авиационного института*. 2020. Т. 27. № 3. С. 60–72. DOI: 10.34759/vst-2020-3-60-72
4. *Копьев В.Ф., Мунин А.Г., Остриков Н.Н.* Проблемы создания перспективных магистральных самолетов, способных удовлетворять нормам ИКАО по шуму на местности // *Труды ЦАГИ*. 2014. № 2739. С. 3–13.
5. *Халецкий Ю.Д.* Эффективность комбинированных глушителей шума авиационных двигателей // *Акустический журнал*. 2012. Т. 58. № 4. С. 556–562.
6. *Евстигнеев А.А., Ланшин А.И., Почкин Я.С.* и др. Проблема шума перспективных ГРДД для дальнемагистральных самолетов // *Авиационные двигатели*. 2022. № 2(15). С. 27–40. DOI: 10.54349/26586061_2022_1_27
7. *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.
8. *Белова С.Е.* Снижение аэродинамического шума турбин перспективных ГТД в источнике на основании применения clocking-эффекта при нестационарном взаимодействии лопаточных венцов // *Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева*. 2013. № 1(24). С. 13–19.
9. *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. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.46.08
10. *Кузнецов В.М.* Эффективность методов снижения шума реактивных струй двигателей пассажирских самолетов // *Акустический журнал*. 2010. Т. 56. № 1. С. 91–102.
11. *Шульдешов Е.М., Краев И.Д., Образцова Е.П.* Материалы для звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 7(101). С. 59–72. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-59-72
12. *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. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.01
13. *Соболев А.Ф., Ушаков В.Г., Филиппова Р.Д.* Звукопоглощающие конструкции гомогенного типа для каналов авиационных двигателей // *Акустический журнал*. 2009. Т. 55. № 6. С. 749–759.
14. *Бакланов В.С., Постнов С.С., Постнова Е.А.* Расчет резонансных звукопоглощающих конструкций для современных авиационных двигателей // *Математическое моделирование*. 2007. Т. 19. № 8. С. 22–31.
15. *Pisarev P.V., Anoshkin A.N.* Numerical study of the acoustic efficiency of a group of Helmholtz resonators of various configurations // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 243. No. 6: 00018. DOI: 10.1051/mateconf/201824300018
16. *Shi X., Mak C.M.* Helmholtz resonator with a spiral neck // *Applied Acoustics*. 2015. No. 99, pp. 68–71. DOI: 10.1016/j.apacoust.2015.05.012
17. *Selamet A., Lee I.* Helmholtz resonator with extended neck // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2003. Vol. 113. No. 4, pp. 1975–1985. DOI: 10.1121/1.1558379
18. *Pisarev P.V., Maksimova K.A.* Calculation of the acoustic efficiency of smart resonant cells // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (09–13 September 2019; Sevastopol)*. Vol. 709. No. 4: 044015. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044015
19. *Griffin S., Lane S.A., Huybrechts S.* Coupled Helmholtz resonators for acoustic attenuation // *Journal of Vibration and Acoustics*. 2001. Vol. 123. No. 1, pp. 11–17. DOI: 10.1115/1.1320812
20. *Писарев П.В., Аношкин А.Н., Паньков А.А.* Составная звукопоглощающая панель. Патент RU 2724095 С1. Бюл. № 17, 19.06.2020.

References

1. Fiev K.P. *Noise Theory and Practice*, 2021, vol. 7, no. 2(24), pp. 139–150.
2. Moshkov P.A., Vasilenkov D.A., Rubanovskii V.V., Stroganov A.I. Noise sources localization in the RRJ-95 aircraft pressure cabin by spherical microphone array. Part 1. Cockpit. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 2, pp. 37–51. DOI: 10.34759/vst-2020-2-37-51
3. Moshkov P.A., Vasilenkov D.A., Rubanovskii V.V., Stroganov A.I. Noise sources localization in the RRJ-95 aircraft pressure cabin by spherical microphone array. Part 2. Passenger cabin. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 3, pp. 60–72. DOI: 10.34759/vst-2020-3-60-72
4. Kop'ev V.F., Munin A.G., Ostrikov N.N. *Trudy TsAGI*, 2014, no. 2739, pp. 3–13.
5. Khaletskii Yu.D. *Akusticheskii zhurnal*, 2012, vol. 58, no. 4, pp. 556–562.
6. Evstigneev A.A., Lanshin A.I., Pochkin Ya.S. et al. *Aviatsionnye dvigateli*, 2022, no. 2(15), pp. 27–40. DOI: 10.54349/26586061_2022_1_27
7. Tsyplukhina Yu.V., Manchenko E.V. *Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoi oborony i likvidatsii posledstviy chrezvychainykh situatsii*, 2016, no. 1-1(7), pp. 356–360..
8. Belova S.E. *Vestnik RGATA im. P.A. Solov'eva*, 2013, no. 1(24), pp. 13–19.
9. Zakharov A.G., Anoshkin A.N., Pan'kov A.A., Pisarev P.V. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2016, no. 46, pp. 144–159. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.46.08
10. Kuznetsov V.M. *Akusticheskii zhurnal*, 2010, vol. 56, no. 1, pp. 91–102.
11. Shul'deshov E.M., Kraev I.D., Obratsova E.P. *Trudy VIAM*, 2021, no. 7(101), pp. 59–72. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-59-72
12. Anoshkin A.N., Zakharov A.G., Gorodkova N.A., Chursin V.A. *Vestnik PNIPU. Mekhanika*, 2015, no. 1, pp. 5–20. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.01
13. Sobolev A. F., Ushakov V. G., Filippova R.D. *Akusticheskii zhurnal*, 2009, vol. 55, no. 6, pp. 749–759.
14. Baklanov V.S., Postnov S.S., Postnova E.A. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2007, vol. 19, no. 8, pp. 22–31.
15. Pisarev P.V., Anoshkin A.N. Numerical study of the acoustic efficiency of a group of Helmholtz resonators of various configurations. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 243, no. 6: 00018. DOI: 10.1051/mateconf/201824300018
16. Shi X., Mak C.M. Helmholtz resonator with a spiral neck. *Applied Acoustics*, 2015, no. 99, pp. 68–71. DOI: 10.1016/j.apacoust.2015.05.012
17. Selamat A., Lee I. Helmholtz resonator with extended neck. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, vol. 113, no. 4, pp. 1975–1985. DOI: 10.1121/1.1558379
18. Pisarev P.V., Maksimova K.A. Calculation of the acoustic efficiency of smart resonant cells. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (09–13 September 2019; Sevastopol)*. Vol. 709, no. 4: 044015. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044015
19. Griffin S., Lane S.A., Huybrechts S. Coupled Helmholtz resonators for acoustic attenuation. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2001, vol. 123, no. 1, pp. 11–17. DOI: 10.1115/1.1320812
20. Pisarev P.V., Anoshkin A.N., Pan'kov A.A. *Patent RU 2724095 C1, 19.06.2020*.

Статья поступила в редакцию 09.01.2024; одобрена после рецензирования 12.09.2024; принята к публикации 12.09.2024.
The article was submitted on 09.01.2024; approved after reviewing on 29.09.2024; accepted for publication on 12.09.2024.