

## Оценка акустических характеристик низкочастотных образцов звукопоглощающих конструкций с разной геометрией отверстий методом передаточной функции при высоких уровнях звукового давления

**О.Ю. КУСТОВ**,  
канд. техн. наук,  
**И.В. ХРАМЦОВ**,  
канд. техн. наук,  
**А.А. КУЗНЕЦОВ**,  
аспирант  
(ПНИПУ, Пермь)  
kustovou@yandex.ru

*Рассмотрены акустические характеристики тестовых образцов низкочастотных звукопоглощающих конструкций с удлиненной шейкой отверстий при воздействии высоких уровней звукового давления. Проведена оценка акустического поглощения и вязких диссипативных потерь для образцов с круглыми отверстиями и отверстиями в форме щели и звезды.*

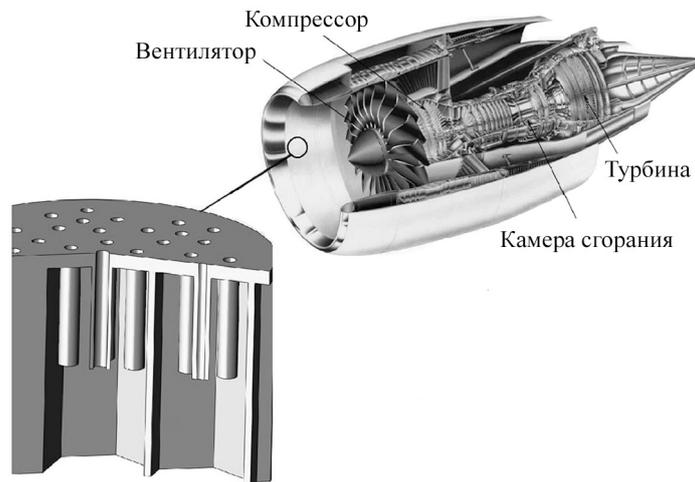
**Аэроакустика, звукопоглощающие конструкции, импеданс, низкие частоты, резонатор с удлиненной шейкой**

Звукопоглощающие конструкции в каналах двигателей самолетов должны иметь минимальную толщину и массу. С развитием авиации совершенствуются силовые установки, что, чаще всего, выражается в увеличении тяги и, как следствие, увеличении степени двухконтурности  $m$ . Увеличиваются размеры лопаток вентилятора, обороты уменьшаются, и частотный диапазон настройки звукопоглощающей конструкции смещается в сторону низких частот. Для двигателей с  $m > 10$  первая гармоника шума вентилятора на режимах взлета, набора высоты и посадки может излучать акустическую энергию на частоте ниже 500 Гц, причем все эти режимы работы осуществляются при уровнях звукового давления более 110 дБ, что соответствует нелинейным режимам работы звукопоглощающей конструкции.

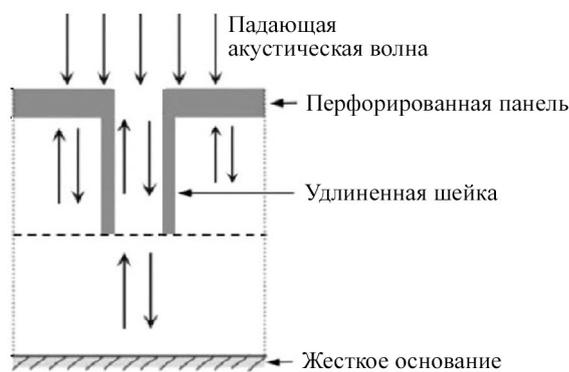
Эффективная работа в низкочастотном диапазоне конструкции резонатора звукопоглощающей конструкции будет зависеть от выбранного способа смещения собственной частоты резонатора в область низких частот. Наиболее простым является вариант увеличения объема полости резонатора [1–3], но при использовании данного метода увеличиваются габариты и масса мотогондолы. Однако благодаря современным аддитивным технологиям можно исследовать такие подходы, как использование удлиненного горла отверстия перфорации. Удлиненное горло позволяет сохранить малую массу конструкции, так как не увеличивается внутренний объем резонатора (рис. 1, а).

На рис. 1, б представлен вариант удлиненного горла (далее – удлиненная шейка) резонатора звукопоглощающей конструкции в разрезе [4]. Данный подход продемонстрирован в работах [5–10], где низкочастотные резонаторы с удлиненной шейкой предоставляют более широкие возможности для управления импедансом посредством увеличения/снижения турбулентной энергии вихря.

В работе [6] на основе аналитических, численных и экспериментальных подходов исследовался резонатор с удлиненной шейкой и влияние его длины, формы, а также перфорации в стенках шейки на акустические характеристики – собственную частоту и коэффициент потерь при касательном прохождении волн. В работах [7, 5] исследовалось влияние на импеданс звукопоглощающей конструкции диаметра отверстия и длины шейки. В статье [8] установлено, что длина шейки и величина смещения собственной частоты резонатора находятся в нелинейной зависимости. В работе [9] рассматривалась звукопоглощающая конструкция с удлиненными шейками и разной глубиной резонаторов. Согласно исследованиям благодаря данной конструкции существенно увеличивается коэффициент звукопоглощения во всем диапазоне рассмотренных частот (100...315 Гц). В исследовании [10] шейка резонатора была не только удлиненной, но и изогнутой. Было также показано, что вследствие уменьшения диаметра шейки и ее удлинения повышается коэффициент звукопоглощения в области низких частот. При этом не выявлено работ, где рассматривались высокие уровни звукового давления.



а



б

Рис. 1

При увеличении уровней звукового давления усиливается влияние на импеданс звукопоглощающей конструкции внутри отверстий перфорированного слоя и на их кромках, внутри и снаружи возникают значительные колебания воздушной массы среды – интенсивная завихренность. Чем выше уровни звукового давления, тем более интенсивные вихри формируются [11]. Что касается нелинейного поведения акустического импеданса отверстия, в исследовании [12] было впервые зафиксировано увеличение акустического сопротивления (импеданса) с соответствующим увеличением скорости частиц в отверстии. Следовательно, за счет вихреобразования поток частиц вырывается из отверстия, а кинетическая энергия, связанная с вращением вихрей срыва, впоследствии рассеивается молекулярной вязкостью. Преобразование акустической энергии в кинетическую энергию образующихся вихрей и последующее рассеивание ее за счет вязкости является доминирующим нелинейным механизмом диссипации [13].

При проектировании новых образцов звукопоглощающих конструкций целесообразно проводить эксперименты на интерферометре с нормальным падением волн, чтобы быстро получить акустические характеристики при высоких уровнях звукового давления. В данной работе рассматриваются именно высокие уровни звукового давления (140 и 160 дБ), что характерно для каналов авиационных двигателей. Эта первая оценка дает представление об акустической эффективности и качестве изготовления выполненного варианта звукопоглощающих конструкций, поэтому измерения на интерферометре должны быть выполнены очень точно.

Для определения акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций при нормальном падении стандартно используют метод передаточной функции [14], метод Дина [15] или метод [16] с использованием двух и более микрофонов. Для получения максимальных данных при измерениях в интерферометре эти три метода можно использовать одновременно и в разных вариациях. При

верификации акустических характеристик с численным моделированием [17] используются два метода – метод передаточной функции и метод Дина. В данной работе проводится экспериментальное исследование определения акустических характеристик образца звукопоглощающих конструкций с помощью метода передаточной функции и полуэмпирической модели [18] для оценки резонансной частоты геометрии при проектировании. Метод передаточной функции представляет собой экспериментальный подход к определению нормализованного импеданса через коэффициент отражения по результатам измерений акустического поля при использовании двух и более микрофонов в интерферометре нормального падения на основе определения амплитуд падающей и отраженной волн:

$$Z = \frac{P}{u} = \frac{1+R}{1-R} \rho c,$$

где  $P$  – акустическое давление на поверхности звукопоглощающей конструкций, Па;  $u$  – нормальная компонента акустической скорости на поверхности звукопоглощающей конструкции, м/с;  $R = C/B$  – коэффициент отражения;  $B, C$  – амплитуды падающей и отраженной волн;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – скорость звука, м/с.

Резонансная частота образцов звукопоглощающих конструкций определялась по полуэмпирической модели [18] следующим образом:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \frac{g}{\sqrt{L \left( l + l_i + l_e + L \frac{g^2}{3} \right)}},$$

где  $g = \sqrt{S_0/S}$ ;  $S_0$  – площадь отверстия, м<sup>2</sup>;  $S$  – площадь поперечного сечения внутренней полости резонатора, м<sup>2</sup>;  $L$  – высота резонатора, м;  $l$  – высота шейки, м;  $l_i, l_e$  – полуэмпирические поправки, м.

На первом этапе исследования проанализированы три модельных образца звукопоглощающих конструкций с габаритным диаметром 30 мм, высотой 22 мм и диаметрами одиночных отверстий 4,6; 4,8; 5 мм (рис. 2, *a*). Низкочастотные образцы с диаметрами отверстий 4,6; 4,8; 5 мм характеризуются наличием шейки отверстия (цилиндр), углубленной на 10 мм во внутренний объем резонатора (рис. 2, *b*). Одно, два и три отверстия с диаметрами 4,6 мм (рис. 2, *a, в, д*) сравнивались с целью анализа зависимости для идентичных образцов с удлиненной шейкой. Также сравнивался образец с отверстием 5 мм с образцами с отверстиями в форме щели и форме звезды идентичной площадью в 5 мм (рис. 2, *ж, з*).

На втором этапе дополнительно рассмотрены только низкочастотные образцы с удлиненной шейкой в случае двух и трех отверстий на образце с диаметром 4,6 мм (рис. 2, *г, е*). Также исследуются образцы с удлиненной шейкой отверстий в форме щели и звезды с идентичной площадью для образца с отверстием 5 мм. Все натурные образцы напечатаны на 3D-принтере, имеют боковую стенку, и в каждом образце при измерениях использовалось плоское основание. Данные особенности натурных конструкций связаны с необходимостью минимизации акустических утечек, которые отмечались ранее при проведении испытаний образцов звукопоглощающих конструкций [19].

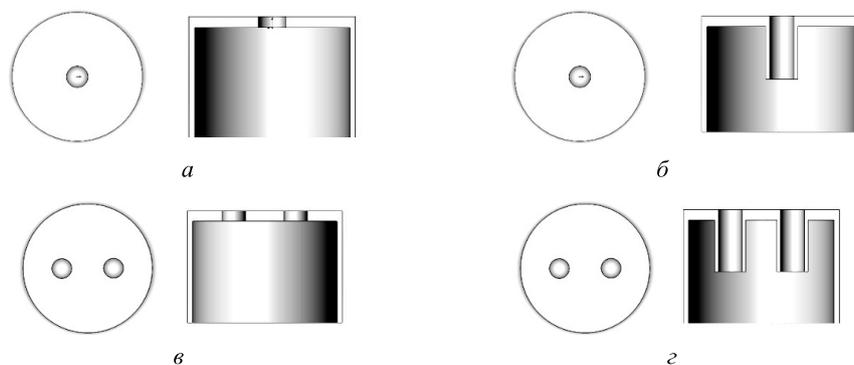


Рис. 2 (Начало)

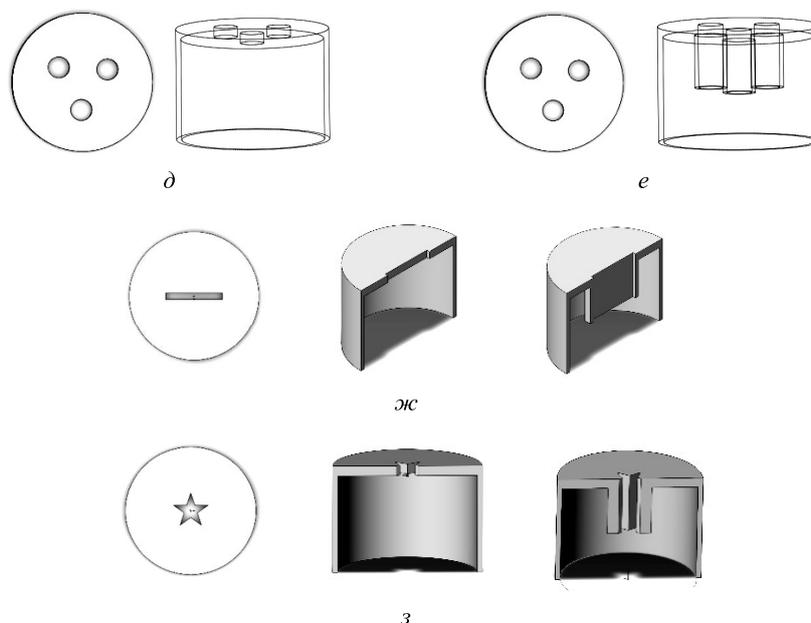


Рис. 2 (Окончание)

Геометрия образцов с диаметром отверстий 4,6 мм приведена в таблице.

Геометрические характеристики	Тестовый образец звукопоглощающих конструкций					
	С одним отверстием	С двумя отверстиями	С тремя отверстиями	С одним отверстием с удлиненной шейкой	С двумя отверстиями с удлиненной шейкой	С тремя отверстиями с удлиненной шейкой
Коэффициент перфорации, %	16,4	23,2	28,4	16,4	23,2	28,4
Толщина пластины перфорации, мм	2	2	2	2+10 (длина шейки)	2+10 (длина шейки)	2+10 (длина шейки)
Глубина резонатора, мм	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5
Расчетная резонансная частота, Гц [18]	903	1268	1536	531	749	914
Резонансная частота, Гц (эксперимент)	900	1290	1565	533	769	950

Измерения на интерферометре нормального падения волн с рабочим диаметром  $d = 30$  мм [20] (рис. 3) проводились при широкополосном сигнале с уровнями звукового давления 140 и 160 дБ с использованием аппаратуры фирмы Briel & Kjaer (Дания).

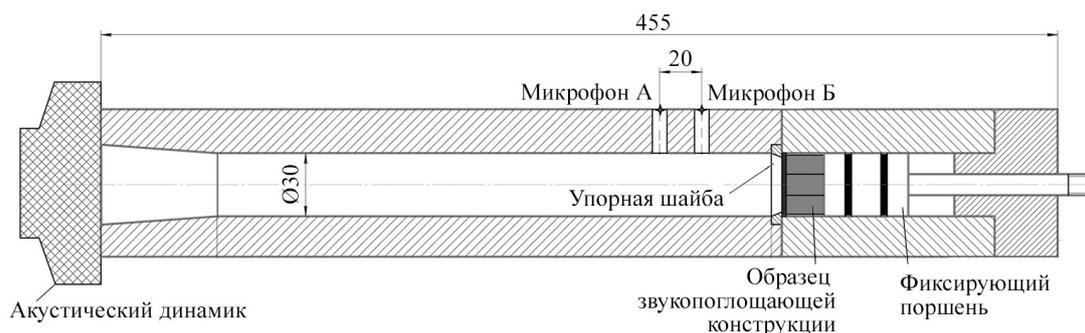


Рис. 3

Известные результаты экспериментального определения коэффициента звукопоглощения  $\alpha$  для разной степени перфорации [21] подтверждены смещением резонансной частоты при одинаковом объеме резонатора с разными рассматриваемыми диаметрами отверстий при 140 дБ (рис. 4, а) и 160 дБ (рис. 4, в). Дополнительно представлена зависимость действительной части импеданса ( $ReZ$ ) при высоких уровнях звукового давления 140 (рис. 4, б) и 160 дБ (рис. 4, г).

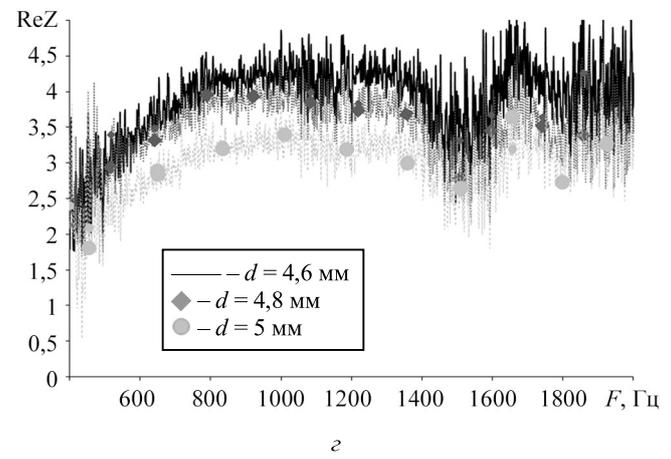
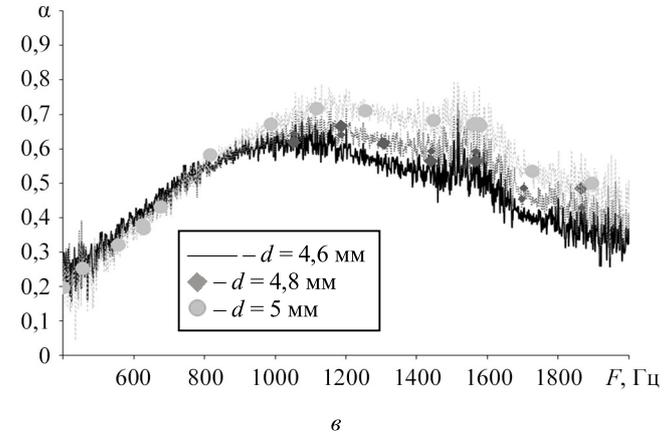
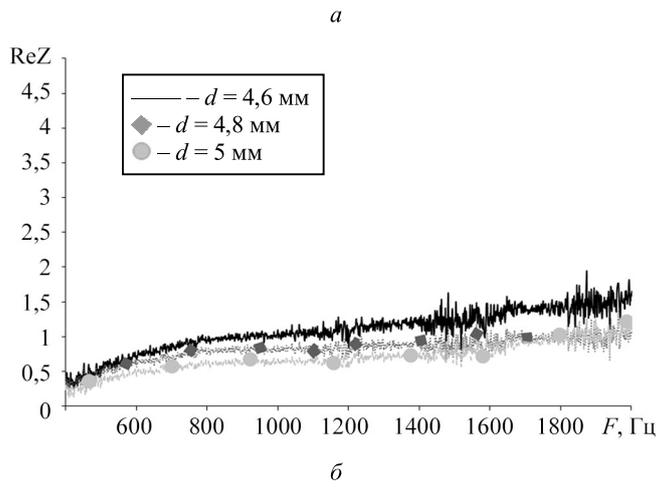
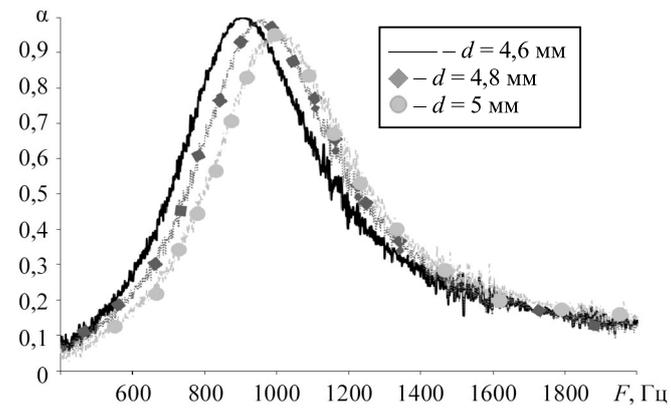


Рис. 4

Как видим (см. рис. 4), при высоких уровнях звукового давления происходят интенсивные процессы диссипации и получены высокие значения коэффициента звукопоглощения. Однако не всегда высокий коэффициент звукопоглощения, соответствующий высоким значениям  $ReZ$ , обеспечивает максимально возможное снижение шума самолета на местности.

В случае образцов с удлиненной шейкой наблюдается предсказуемое смещение резонансных частот при 140 дБ (рис. 5, а) и 160 дБ (рис. 5, в), а также большие значения диссипативных эффектов при высоких уровнях звукового давления за счет увеличенной длины отверстия (рис. 5, б). При 160 дБ кривые действительной части импеданса (рис. 5, в) почти идентичны, что говорит о малом влиянии диаметра ( $\pm 0,5$  мм) в случае удлиненной шейки резонатора. Результаты, полученные с помощью полуэмпирической модели [18] для оценки резонансной частоты низкочастотных образцов (см. таблицу), имеют минимальное расхождение с результатами эксперимента.

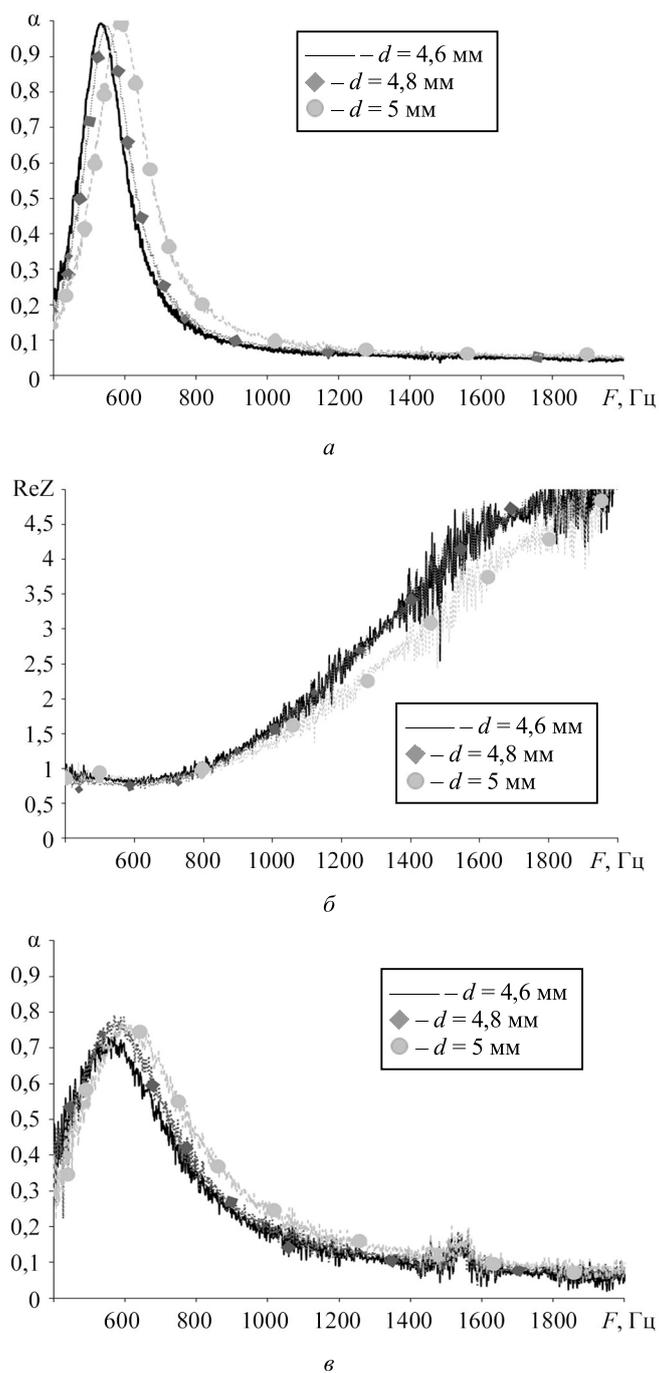


Рис. 5 (Начало)

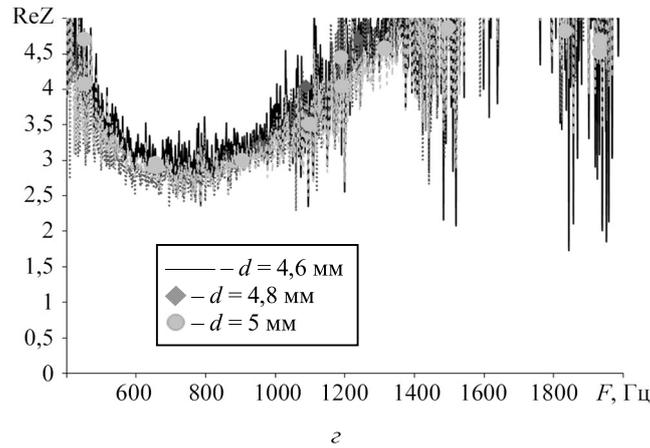


Рис. 5 (Окончание)

На рис. 6, а, в приведен коэффициент звукопоглощения, на рис. 6, б, г – действительная часть импеданса при уровнях звукового давления 140 дБ (см. рис. 6, а, б) и 160 дБ (см. рис. 6, в, г).

В случае идентичных образцов, но с удлиненной шейкой наблюдается смещение резонансной частоты (рис. 7, а, в) и получены аналогичные зависимости. Увеличение действительной части импеданса на высоких частотах вдали от резонансной частоты (рис. 7, б, г) связано с особенностью метода с применением двух микрофонов. В перспективе необходимо сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, полученными методом Дина с тональным излучением звука и численным моделированием.

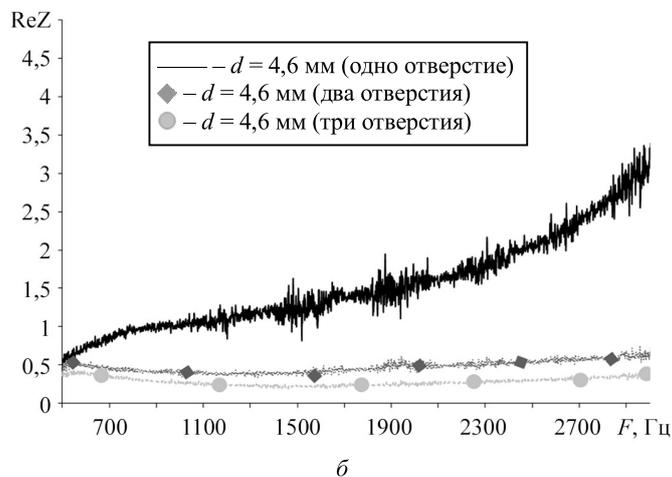
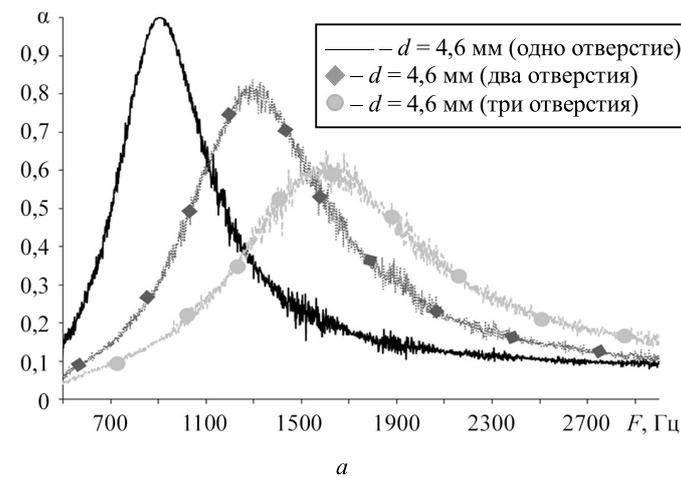


Рис. 6 (Начало)

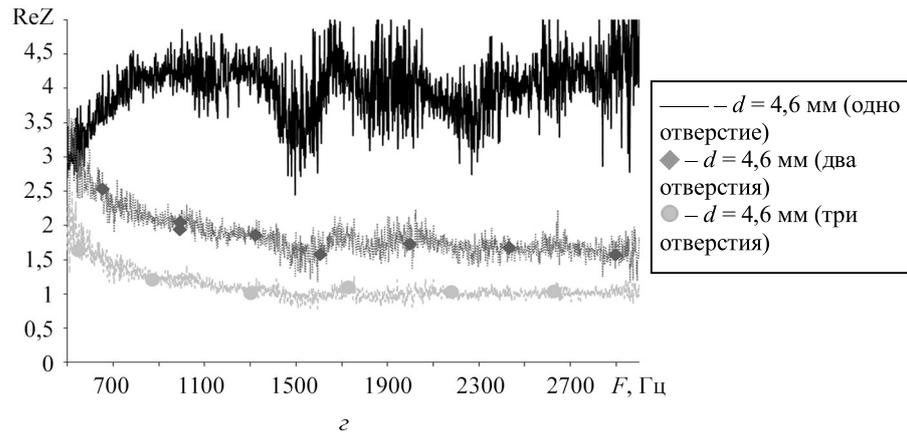
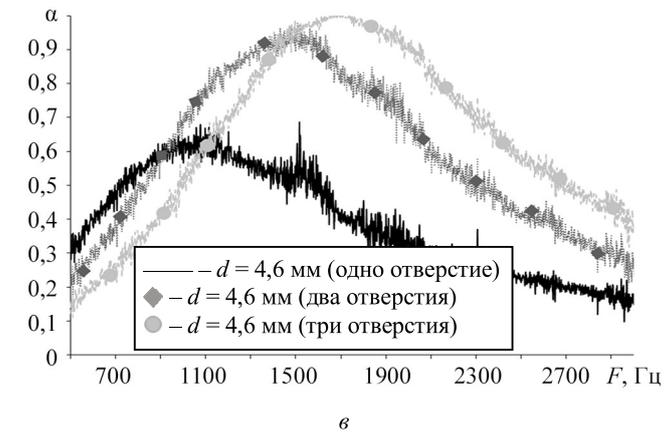


Рис. 6 (Окончание)

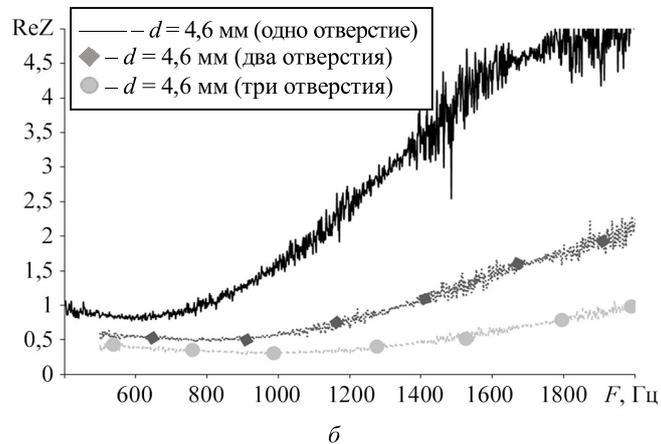
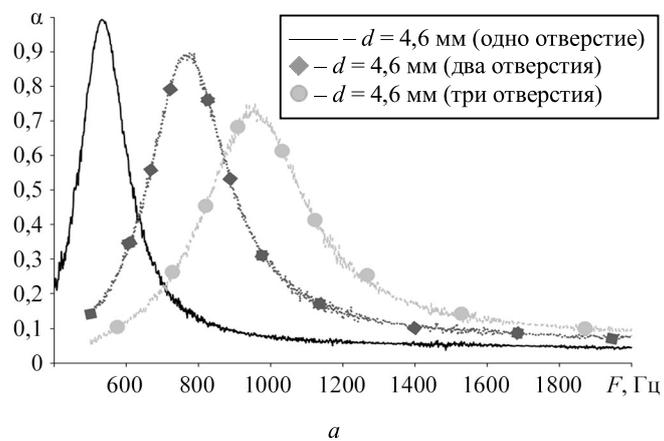


Рис. 7 (Начало)

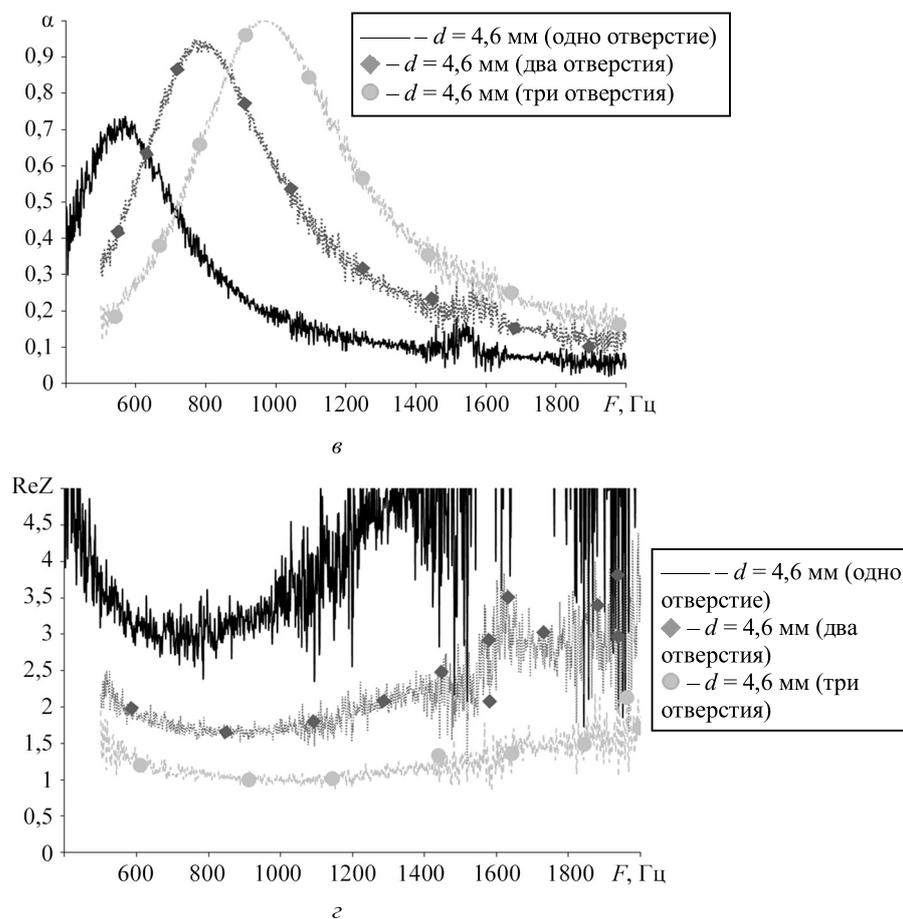


Рис. 7 (Окончание)

В научной литературе отмечается, что перемешивание некруглых струй намного интенсивнее на выходе из сопла с формой в виде шевронов, лепестков или звездообразных отверстий [22–23]. С учетом этого можно предположить, что из-за повышенного перемешивания в ближнем поле у такого отверстия в звукопоглощающей конструкции может увеличиться сопротивление и возникнуть потери акустической энергии. Следовательно, меньше акустической энергии отражается обратно к источнику, и коэффициент поглощения увеличивается [24]. В частности, в работе [25] исследовали изолированные прямоугольные отверстия и связывали эффективный радиус отверстия с импедансом. По результатам, полученным в случае образцов с отверстиями в форме щели и форме звезды без удлиненной шейки (рис. 8) и с удлиненной шейкой (рис. 9), доказана эффективность нестандартного отверстия в образце в сравнении с образцом с круглым отверстием в отношении увеличения действительной части импеданса, а следовательно, и диссипативных эффектов в области резонансных частот.

Приведем действительную часть импеданса для разных форм отверстий без удлиненной шейки при 140 дБ (рис. 8, б) и 160 дБ (рис. 8, г). Действительную часть импеданса для разных форм отверстий с удлиненной шейкой при 140 дБ демонстрирует рис. 9, б, при 160 дБ – рис. 9, г.

Приведем коэффициент звукопоглощения для разных форм отверстий без удлиненной шейки при 140 дБ (рис. 8, а) и 160 дБ (рис. 8, в). Коэффициент звукопоглощения для разных форм отверстий с удлиненной шейкой при 140 дБ показан на рис. 9, а, при 160 дБ – на рис. 9, в.

Коэффициент звукопоглощения и резонансные частоты при 140 и 160 дБ для отверстий разных форм, но с идентичной площадью имеют минимальное расхождение в значениях.

Для дальнейшего исследования влияния геометрических параметров низкочастотных образцов звукопоглощающих конструкций на акустический импеданс необходимо провести исследование нелинейных процессов на поверхности и внутри резонаторов с нестандартными отверстиями с помощью численного моделирования.

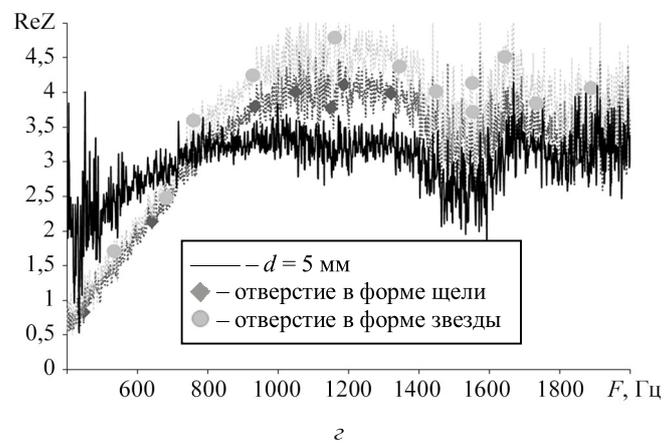
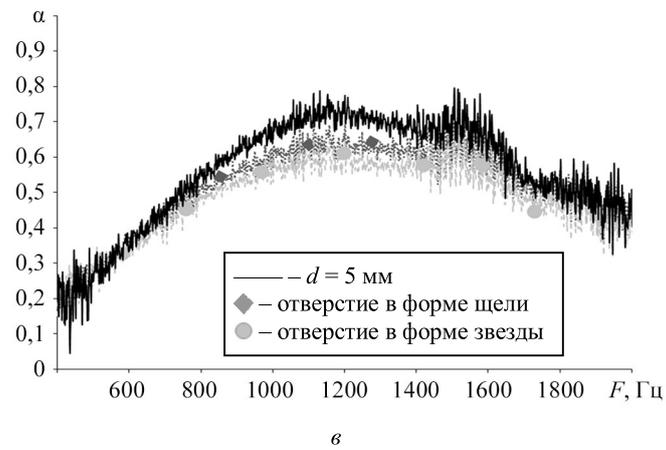
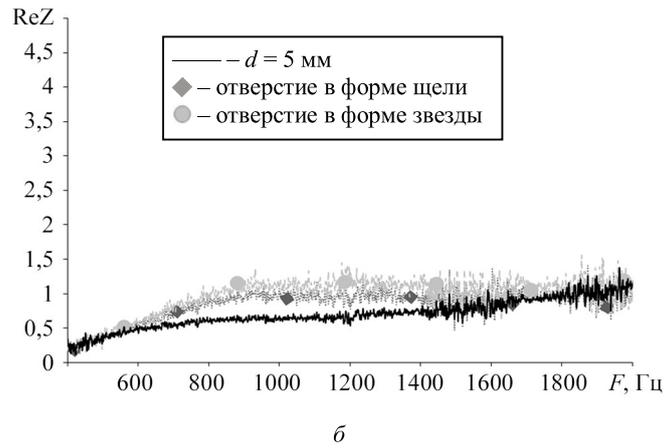
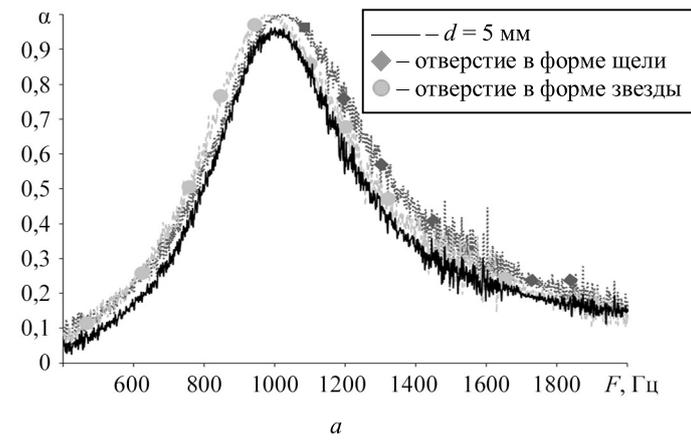
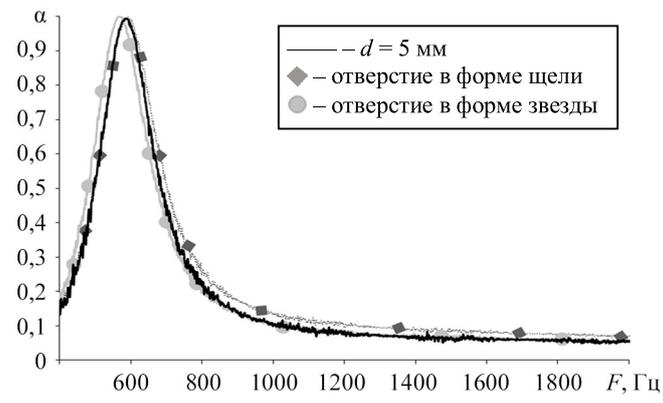
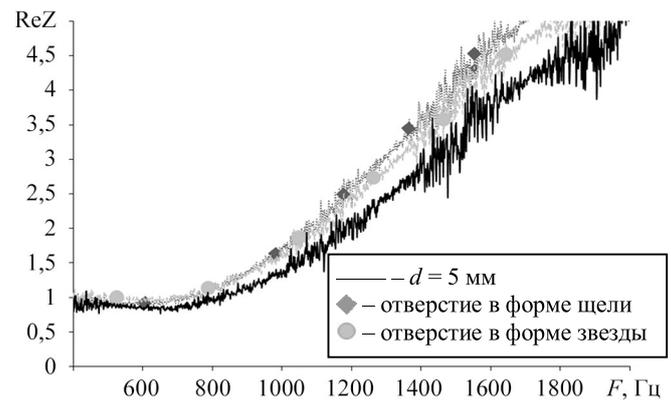


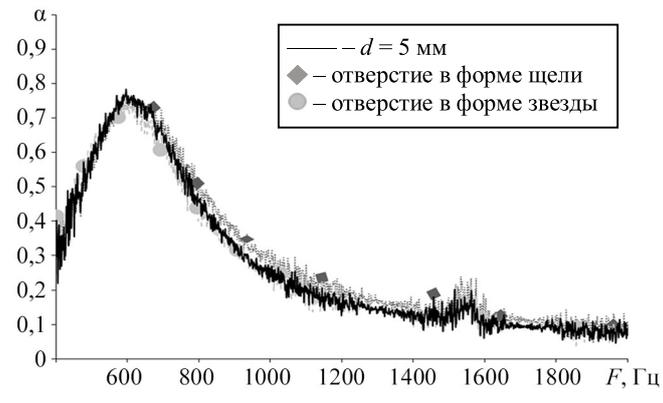
Рис. 8



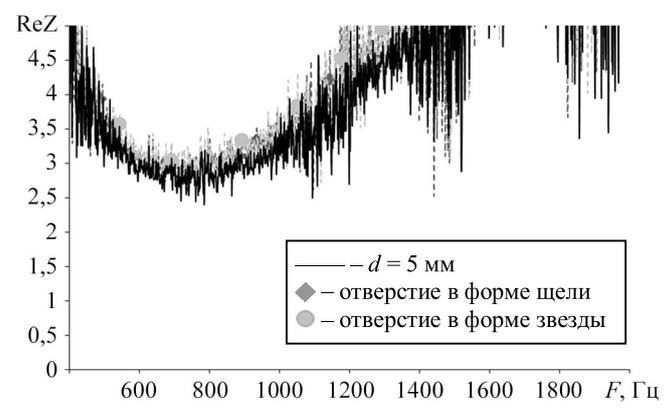
а



б



в



г

Рис. 9

При сравнении мнимой части импеданса ( $ImZ$ , рис. 10) стандартного круглого отверстия и двух нестандартных отверстий с удлиненной шейкой при 160 дБ с сохранением заданных проектных характеристик доказаны возможность и актуальность применения данного подхода проектирования низкочастотных звукопоглощающих конструкций. Сохраняя идентичную площадь для разной геометрии, удалось сохранить проектную резонансную частоту.

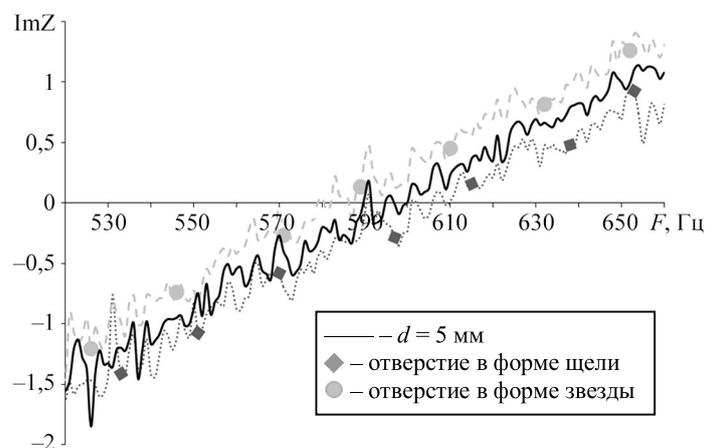


Рис. 10

На основе полученных данных можно сделать следующие выводы для образцов низкочастотных звукопоглощающих конструкций с удлиненной шейкой отверстий, используемых при высоких уровнях звукового давления.

Чем меньше диаметр отверстий, тем выше действительная часть импеданса, аналогично в случаях базовых отверстий.

У образцов с удлиненной шейкой действительная часть импеданса выше, чем в исполнении образцов с двумя и тремя отверстиями. Следовательно, чем выше степень перфорации, тем слабее выражено смещение в область низких частот при удлинении шейки и менее выражена диссипация при высоких уровнях звукового давления.

Хорошо выражена высокая диссипация при 160 дБ у образца с отверстием в форме звезды. Форма отверстий значительно влияет на  $ReZ$  в случае, когда шейка горла не увеличена. Данное заключение необходимо проверить на низкочастотном интерферометре с большим рабочим диаметром на больших количествах резонаторов и отверстий в образце.

При уровнях звукового давления 160 дБ действительная часть импеданса образцов с круглыми отверстиями мало отличается от действительной части импеданса образцов с щелевым отверстием и в виде звезды. При экспериментальных измерениях методом Дина возможны различия.

Сохраняя идентичную площадь для разной геометрии отверстия, как с удлиненной шейкой, так и без нее, удалось сохранить проектную резонансную частоту резонатора.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-00037, <https://rscf.ru/project/24-72-00037/>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sugimoto R., Astley J., Murray P. Low Frequency Liners for Turbofan Engines [Electronical Resource]. URL: [https://www.acoustics.asn.au/conference\\_proceedings/ICA2010/cdrom-ICA2010/papers/p575.pdf](https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICA2010/cdrom-ICA2010/papers/p575.pdf) (дата обращения: 11.01.2025).
2. Tang S.K., Ng C.H., Lam E.Y.L. Experimental Investigation of the Sound Absorption Performance of Compartmented Helmholtz Resonators // Applied Acoustics. 2012. Vol. 73. Iss. 9. P. 969–976.
3. Rasha Al Jahdali, Ying Wu. Coupled Resonators for Sound Trapping and Absorption // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. Article № 13855.

4. *Zhongjian Mei et al.* Broadband Sound Absorption Based on Impedance Decoupling and Modulation Mechanisms // *Journal of the Acoustical Society of America*. 2023. Vol. 154. № 5. P. 3479–3486.
5. *Яковец М.А., Ипатов М.С., Лаврухина М.П.* Экспериментальное исследование низкочастотных звукопоглощающих конструкций // *Акустика среды обитания: Сб. тр. 6-й Всерос. конф. молодых ученых и специалистов, г. Москва, 21 мая 2021. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. С. 299–305.*
6. *Selamat A., Lee I.* Helmholtz Resonator with Extended Neck // *Journal of the Acoustical Society of America*. 2003. Vol. 113. Iss. 4. P. 1975–1985.
7. *Yang C. et al.* Low Frequency Duct Noise Control Using Extended Tube Liners // *Proc. of the AIAA Aviation Forum, June 15–19, 2020, Virtual Event. AIAA Paper № 2020-2615.*
8. *Gautam A., Celik A., Azarpeyvand M.* An Investigation on Neck Extensions for Single and Multidegree of Freedom Acoustic Helmholtz Resonators // *Proc. of the AIAA Aviation Forum, Aug. 2–6, 2021, Virtual Event. AIAA Paper № 2021-2206.*
9. *Dengke Li, Daoqing Chang, Bilong Liu.* Enhancing the Low Frequency Sound Absorption of a Perforated Panel by Parallelarranged Extended Tubes // *Applied Acoustics*. 2016. Vol. 102. P. 126–132.
10. *Zhanlu (Louie) Chen.* Investigation of Helmholtz Resonators with Curved Tapered Embedded Neck Extension [Electronical Resource]. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2309/2309.09852.pdf> (дата обращения: 11.01.2025).
11. *Баикатов В.В., Остриков Н.Н.* Исследование влияния нелинейного режима работы сотовых ЗПК при высоких уровнях звукового давления на распространение звуковых волн в цилиндрическом канале с потоком // *Акустический журнал*. 2024. № 1. С. 11–20.
12. *Sivian L.J.* Acoustic Impedance of Small Orifices // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1935. Vol. 7. Iss. 2. P. 94–101.
13. *Ji C. et al.* Parametric Measurements of the Effect of in-Duct Orifice Edge Shape on Its Noise Damping Performance // *Journal of Sound and Vibration*. 2016. Vol. 384. № 1. P. 130–145.
14. *Chung J.Y., Blaser D.A.* Transfer Function Method of Measuring in-Duct Acoustic Properties. I. Theory // *Journal of Acoustical Society of America*. 1980. Vol. 68. Iss. 3. P. 907–913.
15. *Dean P.D.* An in situ Method of Wall Acoustic Impedance Measurement in Flow Duct // *Journal of Sound and Vibration*. 1974. Vol. 34. Iss. 1. P. 97–130.
16. *Корин И.А. и др.* Оценка азимутальной однородности акустических характеристик звукопоглощающей облицовки авиационного двигателя // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2020. № 1. С. 83–87.
17. *Храмцов И.В., Пальчиковский В.В., Кустов О.Ю.* Расчетно-экспериментальное исследование импеданса образцов ЗПК методом Дина в интерферометре с нормальным падением звуковых волн // *Сб. тр. 34-й сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2022. С. 606–612.*
18. *Федотов Е.С., Пальчиковский В.В.* Исследование работы резонатора Гельмгольца в волноводе прямоугольного сечения // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. 2014. № 38. С. 107–126.
19. *Кустов О.Ю., Храмцов И.В.* Оценка точности определения акустических характеристик образцов резонансных ЗПК при их экспериментальных исследованиях // *Акустика среды обитания: Материалы 5-й Всерос. конф. молодых ученых и специалистов, г. Москва, 24 апр. 2020. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. С. 123–130.*
20. *Кустов О.Ю., Пальчиковский В.В.* Интерферометр для высоких уровней акустического давления // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*. 2015. Т. 1. С. 157–160.
21. *Комкин А.И., Миронов М.А., Быков А.И.* Поглощение звука резонатором Гельмгольца // *Акустический журнал*. 2017. № 4. С. 356–363.
22. *Храмцов И.В. и др.* Снижение шума струи при наличии близкорасположенной пластины // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2024. № 2. С. 96–103.
23. *Brown W., Ahuja K.* Enhancement of Mixing in a Rectangular Jet by Mechanical Tabs: Contractor Report № 182296 / NASA. Washington, 1989. 79. p.
24. *Gaeta R.J., Ahuja K.K.* Effect of Orifice Shape on Acoustic Impedance // *International Journal of Aeroacoustics*. 2016. Vol. 15. Iss. 4-5. P. 474–495.
25. *Ingard U.* On the Theory and Design of Acoustic Resonators // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1953. Vol. 25. Iss. 6. P. 1037–1061.

Поступила в редакцию 11.02.25  
 После доработки 4.03.25  
 Принята к публикации 10.03.25

# Estimation of Acoustic Characteristics for Low-Frequency Sound-Absorbing Structure Samples with Different Hole Geometry by Transfer Function Method at High Sound Pressure Levels

O.YU. KUSTOV, I.V. KHRAMTSOV, AND A.A. KUZNETSOV

PNRPU, Perm

*The acoustic characteristics of low-frequency sound-absorbing structure test samples with extended necks under high sound pressure levels have been examined. An assessment of acoustic absorption and viscous dissipative losses has been conducted for samples with round holes and holes in the shape of a slot and a star-pentagram.*

**Aeroacoustics, sound-absorbing structures, impedance, low frequencies, resonator with extended neck**