

Низкочастотный интерферометр для оценки акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций при высоких уровнях звукового давления

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

Проведена серия сравнительных испытаний для апробации работы нового низкочастотного акустического интерферометра на четырех образцах звукопоглощающих конструкций диаметром 50 мм с сотовым заполнителем. Образцы выполнены с помощью аддитивных технологий с разными геометрическими характеристиками и разными собственными резонансными частотами. Испытания проведены в условиях нормального падения акустических волн с выходным сигналом «белый шум» в частотном диапазоне 0...6400 Гц при уровне звукового давления внутри канала интерферометра 155 дБ.

Аэроакустика, низкочастотный интерферометр, звукопоглощающие конструкции, импеданс, резонатор с удлиненной шейкой

Одним из способов увеличения тяги турбовентиляторных двигателей является увеличение степени двухконтурности m . Использование данного подхода приводит к увеличению диаметра двигателя и сокращению расстояния до крыла самолета, в связи с чем усиливается шум взаимодействия струи и крыла [1]. Другим следствием повышения двухконтурности является увеличение размеров лопаток вентилятора и уменьшение их оборотов. В случае двигателей с $m > 10$ первая гармоника шума вентилятора на режимах взлета, набора высоты и посадки может излучать акустическую энергию на частоте ниже 500 Гц. При таких режимах работы уровни звукового давления могут достигать 160 дБ и более. Снижение уровня шума достигается за счет уменьшения окружной скорости вентилятора либо применения широкохордных лопаток. Для турбовентиляторных двигателей, в отличие от турбовинтовых [2], эффективным методом шумоподавления являются резонансные звукопоглощающие конструкции.

В каналах авиационных двигателей звукопоглощающие конструкции должны характеризоваться минимальными значениями толщины и массы при одновременном обеспечении требуемой стойкости к физико-механическим воздействиям. Эффективность их функционирования в низкочастотном диапазоне может быть повышена за счет конструктивного исполнения резонатора (рис. 1, а) с удлиненным тонкостенным горлышком, заглубленным в сотовый заполнитель. Разрез 3D-модели одного из исследуемых в работе образцов с удлиненным тонкостенным горлышком представлен на (рис. 1, б). Такое решение позволяет сохранить малую массу конструкции, поскольку не приводит к увеличению внутреннего объема резонатора.

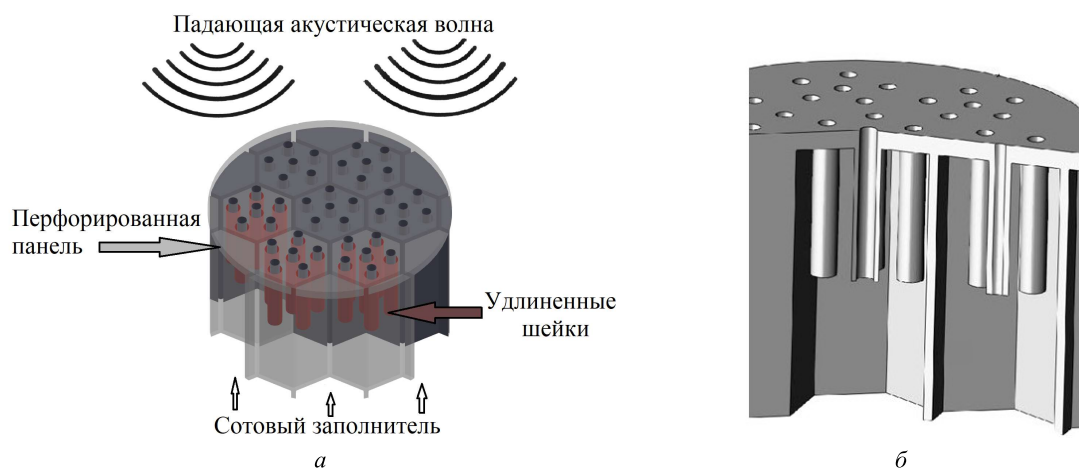


Рис. 1

Применение удлиненного горла (далее – удлиненная шейка) резонатора звукопоглощающей конструкции для управления импедансом посредством увеличения/снижения турбулентной энергии продемонстрировано во работах [3–6]. Подробный обзор серии работ, в которых рассмотрены варианты применения и эффективность удлиненной шейки, проведен в работе [7].

Как известно, увеличение уровня звукового давления на поверхности звукопоглощающих конструкций приводит к росту скорости колебаний частиц в отверстиях. В исследовании [8] было впервые зафиксировано увеличение акустического сопротивления (импеданса) с соответствующим увеличением скорости частиц в отверстии. Рост скорости колебаний увеличивает вихреобразование на кромках 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 [9].

Новые спроектированные звукопоглощающие конструкции с помощью аддитивных технологий или промышленным способом на первом этапе целесообразно оценивать экспериментально на интерферометре с нормальным падением волн. Интерферометры позволяют быстро получить акустические характеристики при высоких уровнях звукового давления, что характерно для каналов авиационных двигателей. В данной работе проводится экспериментальное исследование определения основных акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций (действительной части импеданса) с помощью метода передаточной функции [10] на интерферометре с рабочим диаметром канала $D = 50$ мм [11]. Полученные результаты сравнивались с полуэмпирической моделью [12]. Все измерения на двух модификациях интерферометров нормального падения волн (рис. 2) проводились в частотном диапазоне 0...6400 Гц при генерации сигнала «белый шум» и уровне звукового давления 155 дБ с использованием аппаратуры фирмы Briel & Kjaer (Дания). Базовая конструкция интерферометра (рис. 2, а) имеет меньший рабочий диапазон в зоне низких частот, в сравнении с новой модификацией для низкочастотных измерений. В новой модификации интерферометра (рис. 2, б) реализованы многоканальные измерения (15 микрофонов Type 4944 (Briel & Kjaer)) для подбора пары максимально отдаленных друг от друга микрофонов, эффективно улавливающих низкие частоты.

Согласно исследованию [13] нижний частотный предел для импедансной трубы с внутренним диаметром $D = 50$ мм до частоты отсечки первой моды при расстоянии между образцом и ближним микрофоном у динамика $L = 157$ мм позволяет проводить измерения в диапазоне примерно 150...200 Гц (рис. 3, а). На рис. 3, б показан разрез внутренней части интерферометра, где P_+ – давление падающей акустической волны на образец звукопоглощающей конструкции; P_- – давление отраженной волны от образца при отсутствии потока ($M = 0$).

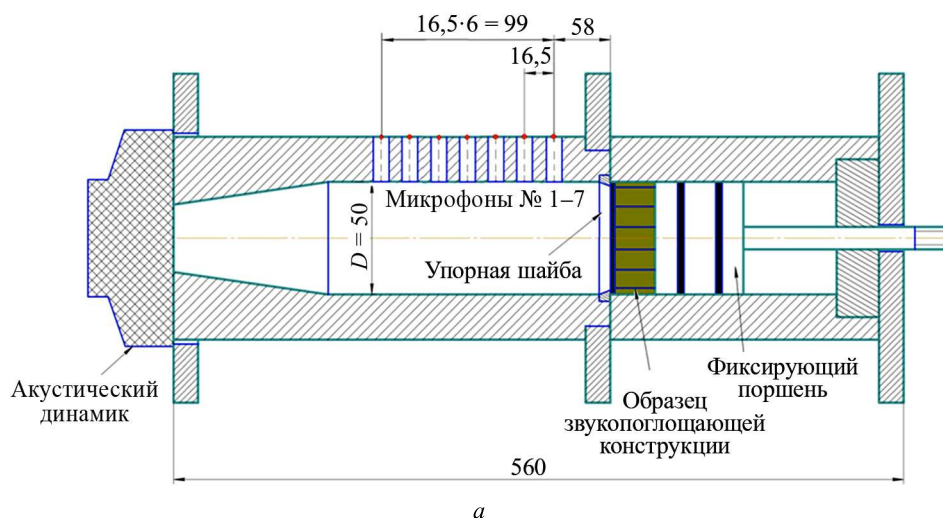
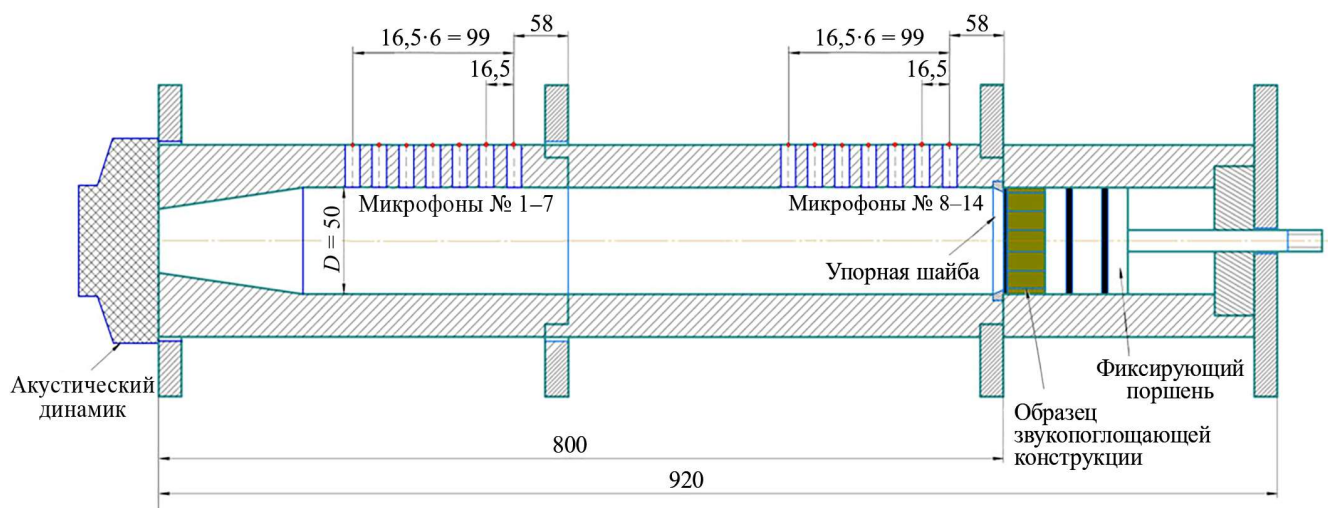
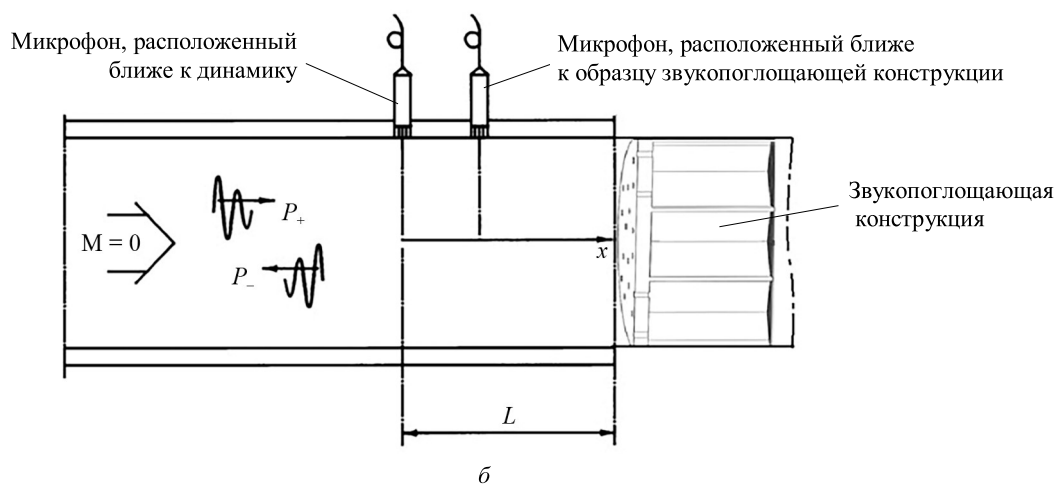
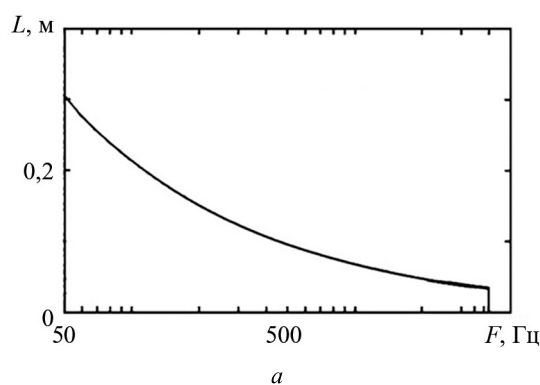


Рис. 2 (Начало)



б
Рис. 2 (Окончание)



б
Рис. 3

При обработке результатов измерений методом передаточной функции на новой модификации использовались микрофон № 14, расположенный у образца (см. рис. 3), и микрофон № 12, а также пары с увеличенным межмикрофонным расстоянием – № 14 и 9, № 14 и 10, № 14 и 11.

Использование пар микрофонов с увеличенным межмикрофонным расстоянием позволило получить качественные результаты на низких частотах, особенно в случае образцов с удлиненной шейкой. Отметим, что измерения с большим количеством микрофонов проводились ранее [14], а первые резуль-

таты низкочастотных измерений на базовой модификации установки «интерферометр с диаметром 50 мм» получены в работе [15].

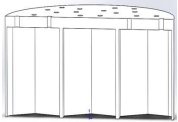
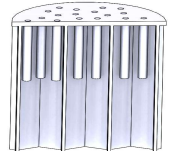
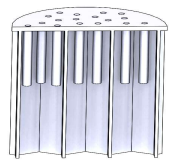
Резонансная частота геометрии каждого образца звукопоглощающей конструкции с целью последующей оценки работоспособности низкочастотного интерферометра в разном частотном диапазоне определялась по формуле

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

где $g = \sqrt{S_0/S}$; S_0 – суммарная площадь отверстий, м²; S – площадь поперечного сечения образца, м²; L – высота резонатора, м; l – высота шейки, м; l_i , l_e – полуэмпирические поправки, м [7].

Для проведения экспериментальных исследований были напечатаны образцы диаметром D из ABS-пластика с различными процентом перфорации F , диаметрами отверстий d , высотой сотового заполнителя H и длиной шейки l_0 .

Характеристики представлены в таблице.

Номер образца	Модель образца	Геометрические параметры					
		H , мм	d , мм	l_0 , мм	D , мм	F , %	f_0 , Гц [12]
1		14	1,5	2	50	3,3	1630
2		30	2	17	50	7,0	738
3		60	2	28	50	5,8	368
4		60	1,2	27	50	2,0	155

Образец № 1 без удлиненной шейки рассматривается как стандартный, базовый, а остальные три образца – с удлиненной шейкой. Использование удлиненной шейки позволило сместить резонансные частоты образцов в область низких частот без существенного увеличения объема сотового заполнителя.

На первом этапе исследования проанализирован изученный ранее стандартный образец звукопоглощающей конструкции (образец № 1) при уровне звукового давления 140 дБ (рис. 4, а) [15]. При сравнении результатов численного моделирования [16] с результатами измерений на двух модификациях интерферометра со стандартным расположением микрофонов выявлено хорошее согласование результатов как по действительной (рис. 4, б), так и по мнимой (рис. 4, в) части импеданса.

Результаты измерений при 155 дБ для двух модификаций интерферометра, полуэмпирической модели и пары микрофонов с увеличенным расстоянием между ними представлены на рис. 5, 6. Наблюдаемые расхождения проявляются как на действительной (рис. 5, 6, а), так и на мнимой части (рис. 5, 6, б)

импеданса. Небольшое снижение кривой на высоких частотах при увеличенном расстоянии (рис. 5, 6, б) указывает на искажение данных после 2500 Гц.

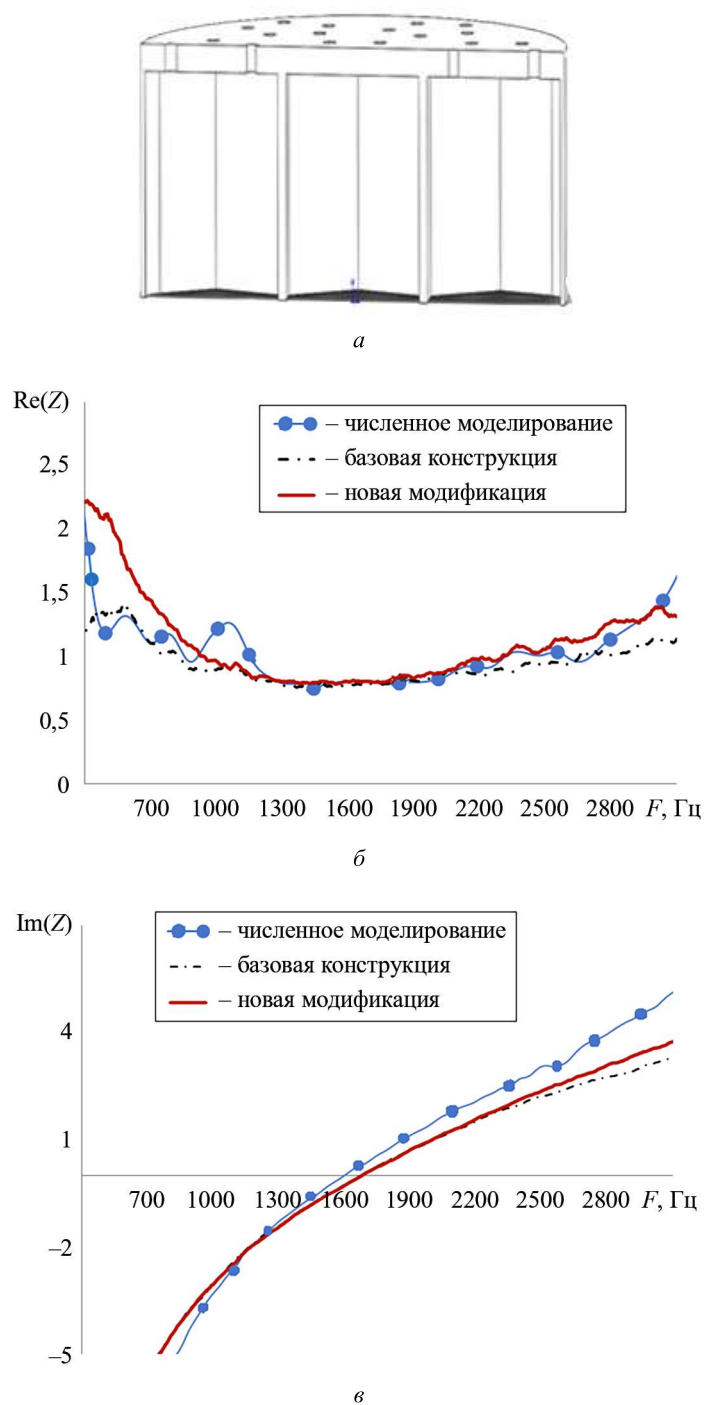
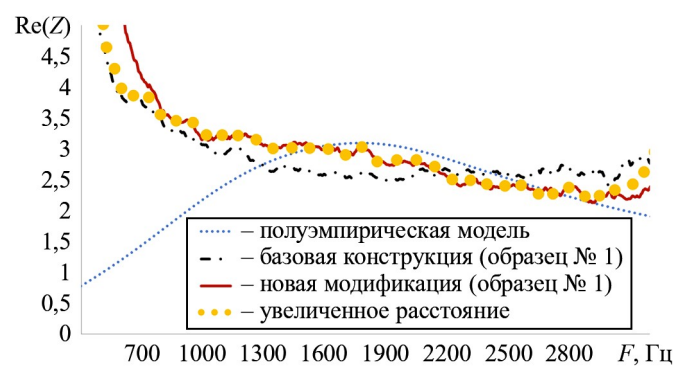
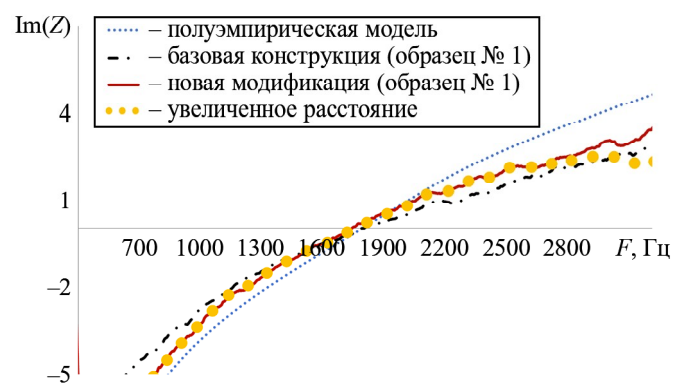


Рис. 4

Влияние увеличенного расстояния заметно в области 400...800 Гц, но затем наблюдается полное повторение импедансной кривой для новой модификации до 3000 Гц. При комбинировании результатов новой модификации интерферометра (микрофоны № 14, 12) и результатов для пары микрофонов с увеличенным расстоянием между ними получена кривая, максимально близкая к кривой полуэмпирической модели в резонансной области (см. рис. 6). Частоты до 1500 Гц – это измерения при увеличенном расстоянии, а все частоты выше получены методом передаточной функции с помощью интерферометра новой модификации. Далее с понижением резонансной частоты образцов результаты будут улучшаться.

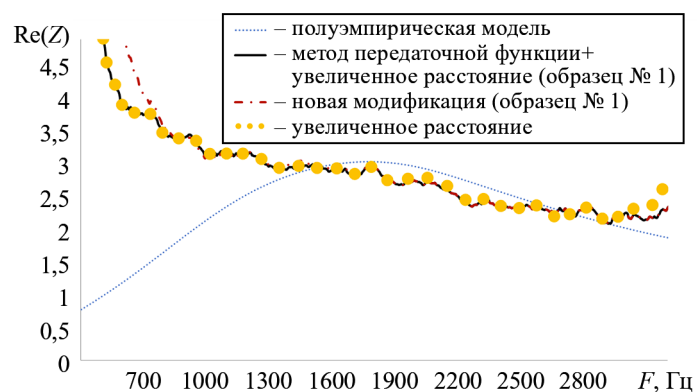


a

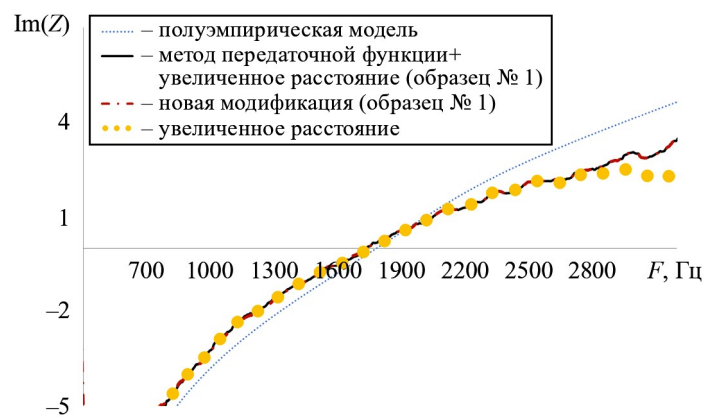


б

Рис. 5



a



б

Рис. 6

На втором этапе рассмотрены низкочастотные образцы с удлиненной шейкой. Для образца № 2 (рис. 7, 8) расхождения между модификациями интерферометров заметнее, особенно на значениях для действительной части импеданса $\text{Re}(Z)$ (рис. 7, 8, *a*). Для образцов № 3, 4 с более удлиненной шейкой расхождение результатов на низких частотах увеличивается (рис. 9, 11, *a*). На мнимой части импеданса у всех образцов (рис. 7–10, *б*) расхождения в результатах минимальны, у образца № 4 (рис. 11, 12, *б*) разброс значений на нижних частотах обусловлен пределом измерений импедансной трубы, описанным ранее.

Новая модификация, реализованная по схеме «метод передаточной функции в сочетании с использованием пары микрофонов с увеличенным межмикрофонным расстоянием» (рис. 8, 10, 12, *a*), обеспечивает приближение результатов измерений действительной части импеданса к данным полуэмпирической модели для всех образцов.

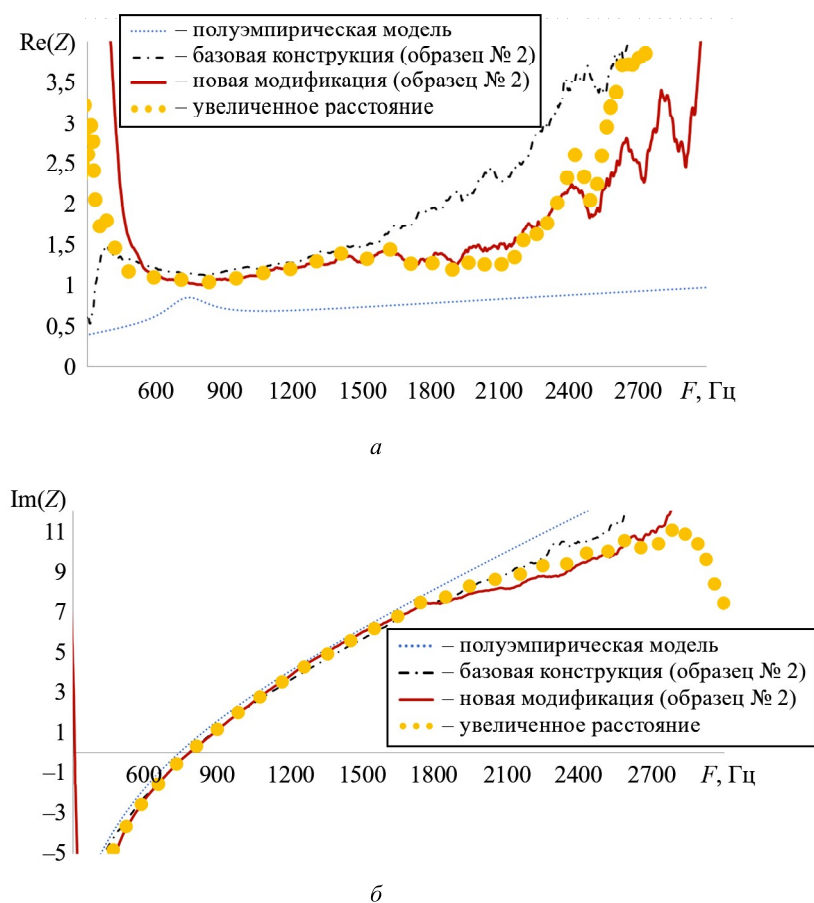


Рис. 7

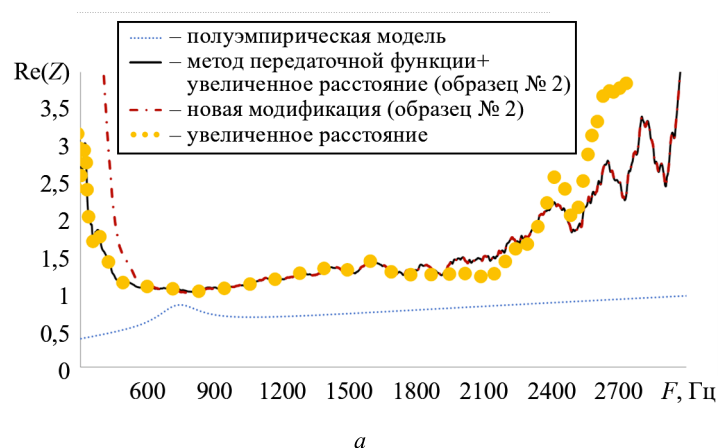


Рис. 8 (Начало)

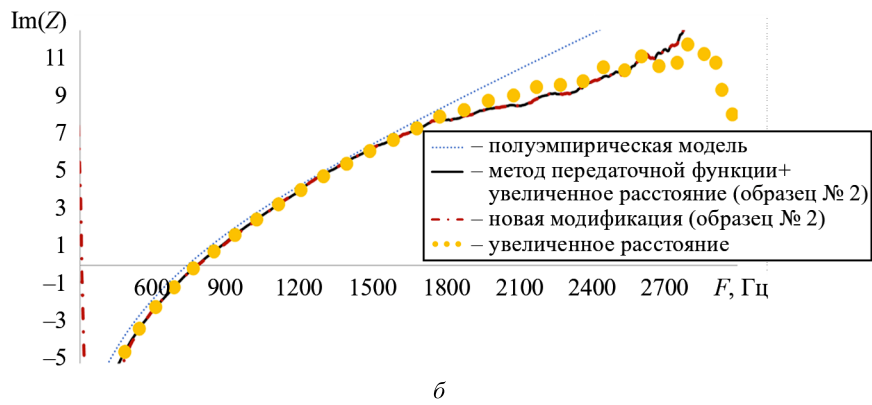


Рис. 8 (Окончание)

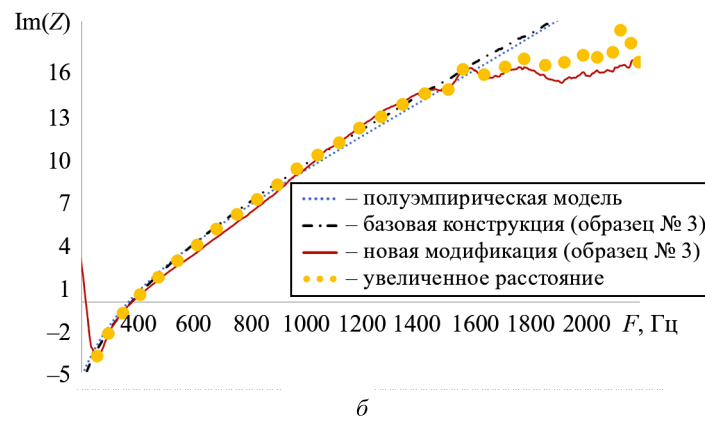
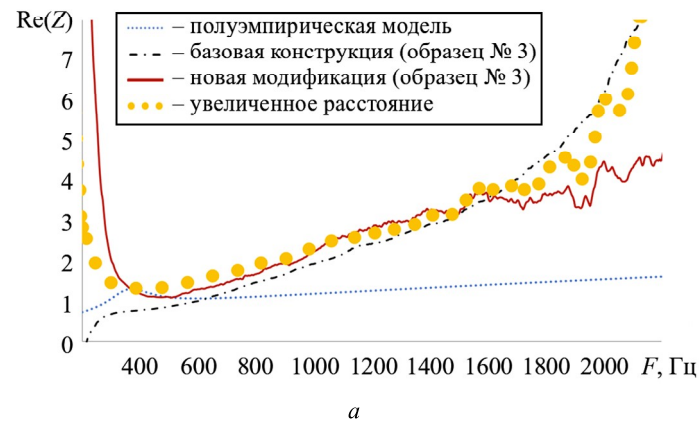


Рис. 9

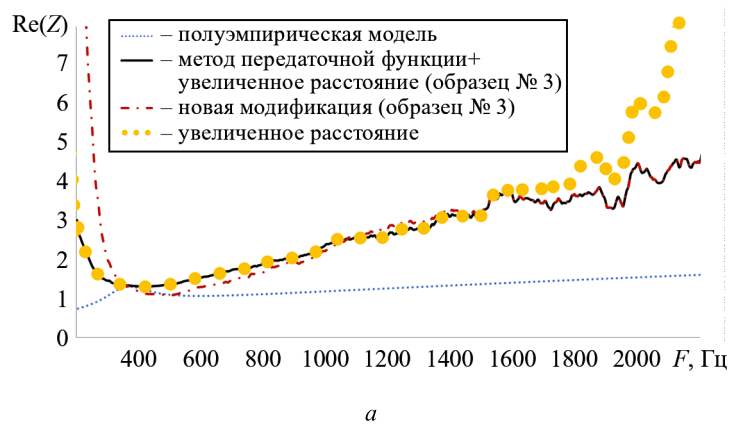


Рис. 10 (Начало)

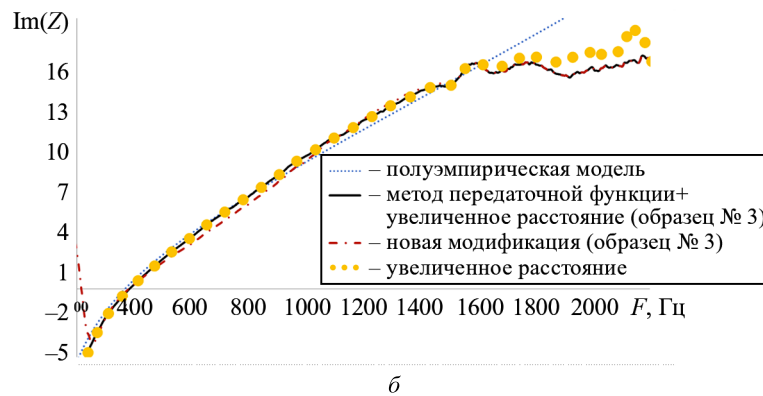


Рис. 10 (Окончание)

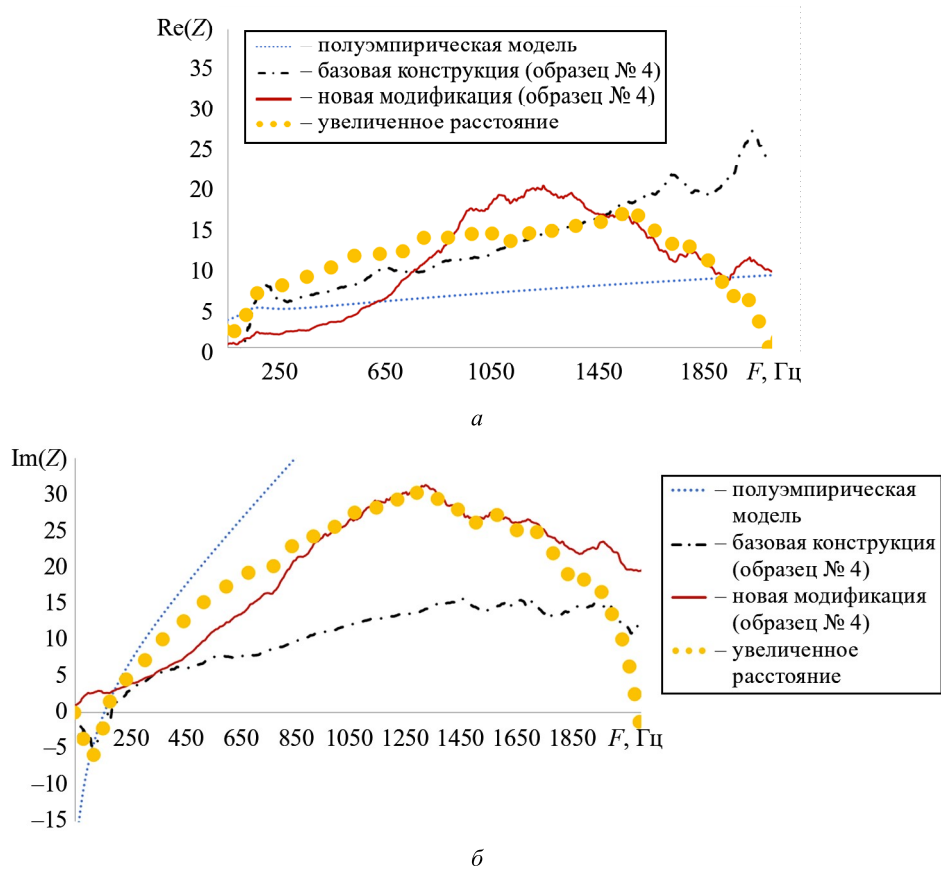


Рис. 11

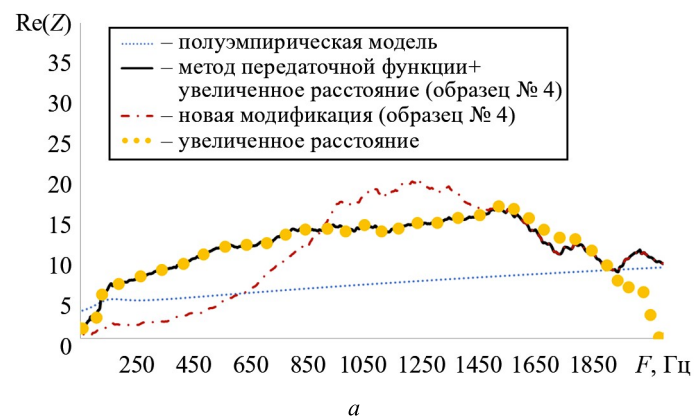
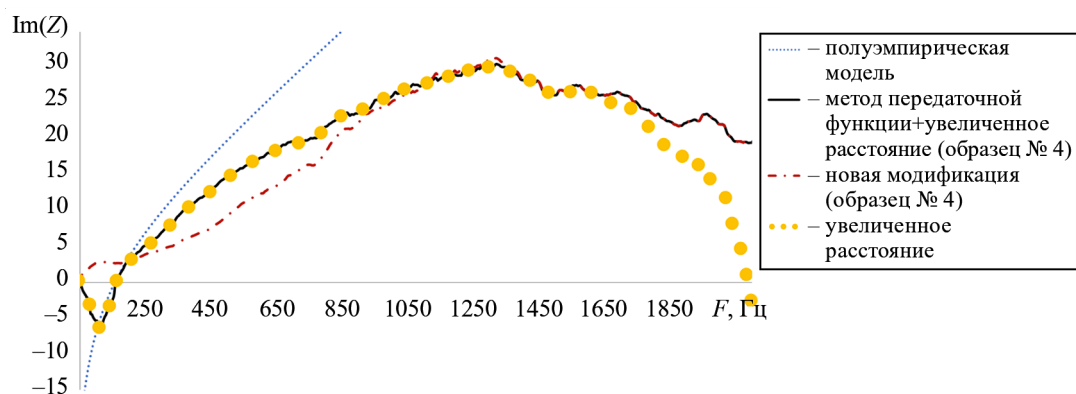


Рис. 12 (Начало)



б

Рис. 12 (Окончание)

Результаты, полученные с использованием полуэмпирической модели [12], демонстрируют минимальное расхождение с экспериментальными данными в области резонансных частот. Следует отметить, что снижение уровней в низкочастотной области у образцов № 3, 4 в диапазоне 50...400 Гц также обусловлено особенностями амплитудно-частотной характеристики высокочастотного драйвера. Уровень звукового давления (SPL) низких частот на поверхности образцов при эксперименте ниже, чем усиливает и генерирует аппаратура. Частотные характеристики используемой модели динамика JBL 2451H в зависимости от SPL представлены на рис. 13 [17].

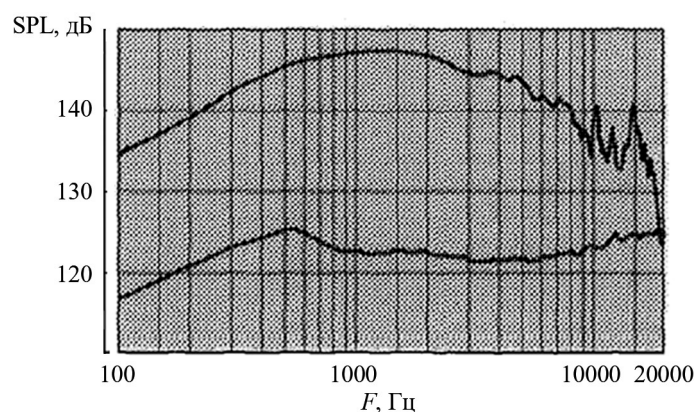


Рис. 13

На основе полученных данных при измерениях на удлиненном низкочастотном интерферометре и высоких уровнях звукового давления можно сделать следующие выводы.

Увеличение длины импедансной трубы в новой модификации оказывает незначительное влияние на результаты измерений для образцов звукопоглощающих конструкций с резонансными частотами, превышающими 1 кГц.

Анализ полученных распределений импеданса по частоте показал, что модифицированный вариант интерферометра обеспечивает результаты, сопоставимые с данными, полученными на базовой конструкции интерферометра для образцов с собственными частотами выше 700 Гц. В случае низкочастотных образцов звукопоглощающих конструкций наблюдается некоторое расхождение между результатами, полученными на новой и прежней версиях интерферометра, при этом данные модифицированной установки демонстрируют лучшее согласование с расчетами по полуэмпирической модели.

Установлено, что чем больше расстояние между микрофонами, тем выше точность низкочастотных измерений. Рекомендуется, чтобы расстояние между микрофонами превышало 1 %, но не более 5 % от длины волны нижней интересующей частоты (резонансной частоты исследуемого образца) [15, 18].

Новая модификация интерферометра в удлиненном исполнении позволяет измерять образцы, полученные методом передаточной функции, в диапазоне 200... 4000 Гц. Подход, основанный на применении метода передаточной функции в сочетании с использованием пары микрофонов с увеличенным межмикрофонным расстоянием, обеспечивает возможность проведения измерений в частотном диапазоне 50...4000 Гц.

Для уменьшения снижения уровней кривых в низкочастотной области (до 400 Гц), по-видимому, целесообразно дополнительно проводить измерения с использованием тональных сигналов, обеспечивающих повышение уровня звукового давления в данном диапазоне частот, а также применять высокочастотный драйвер с равномерной амплитудно-частотной характеристикой в области низких частот.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Храмцов И.В. и др. Снижение шума струи при наличии близкорасположенной пластины // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 2. С. 96–103.
2. Мошков П.А., Самохин В.Ф., Яковлев А.А. Проблемы снижения шума, создаваемого на местности самолетами с турбовинтовентиляторными двигателями // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 4. С. 126–128.
3. 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.
4. 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.
5. Selamat A., Lee I. Helmholtz Resonator with Extended Neck // Journal of the Acoustical Society of America. 2003. Vol. 113. Iss. 4. P. 1975–1985.
6. 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.
7. Кустов О.Ю., Храмцов И.В., Кузнецов А.А. Оценка акустических характеристик низкочастотных образцов звукопоглощающих конструкций с разной геометрией отверстий методом передаточной функции при высоких уровнях звукового давления // Изв. вузов. Авиационная техника. 2025. № 1. С. 147–160.
8. Sivian L.J. Acoustic Impedance of Small Orifices // Journal of the Acoustical Society of America. 1935. Vol. 7. Iss. 2. P. 94–101.
9. 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. P. 130–145.
10. 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.
11. Пальчиковский В.В. и др. Исследование акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций в интерферометрах с разным диаметром поперечного сечения канала // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. № 51. С. 62–73.
12. Соболев А.Ф. Полуэмпирическая теория однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций с лицевой перфорированной панелью // Акустический журнал. 2007. № 6. С. 861–872.
13. Bodén H., Abom M. Influence of Errors on the Two-Microphone Method for Measuring Acoustic Properties in Ducts // Journal of the Acoustical Society of America. 1986. Vol. 79. Iss. 2. P. 541–549.
14. Корин И.А. и др. Оценка азимутальной однородности акустических характеристик звукопоглощающей облицовки авиационного двигателя // Изв. вузов. Авиационная техника. 2020. № 1. С. 83–87.
15. Кустов О.Ю. и др. О возможности низкочастотных измерений в интерферометре при высоких уровнях звукового давления // Акустика среды обитания: Материалы 10-й Всерос. конф. молодых ученых и специалистов, г. Москва, 29–30 мая 2025. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. С. 231–239.
16. 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.
17. JBL 2451H Compression Driver [Electronical Resource]. URL: <https://www.toutlehautparleur.com/media/catalog/product/datasheet/jbl/2451H-8.pdf> (дата обращения: 19.10.2025).

18. *Đuriš R., Labašová E.* The Design of an Impedance Tube and Testing of Sound Absorption Coefficient of Selected Materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021.Vol. 1050. Article № 012003.

Поступила в редакцию 19.11.25

После доработки 21.11.25

Принята к публикации 1.12.25

Low-Frequency Interferometer for Estimation of Acoustic Performance of Liner Samples at High Sound Pressure Levels

O.YU. KUSTOV, I.V. KHRAMTSOV, V.V. PAL'CHIKOVSKII,
V.V. ERSHOV, A.A. KUZNETSOV, AND I.A. KORIN

PNRPU, Perm

To validate the operation of a new low-frequency acoustic interferometer, a series of comparative tests was carried out on four acoustic liner samples with a diameter of 50 mm and a honeycomb core. The samples were manufactured using additive technologies with different geometric characteristics and different natural resonant frequencies. The tests were carried out under conditions of normal incidence of acoustic waves with a "white noise" output signal in the frequency range 0...6400 Hz at a sound pressure level inside the interferometer duct of 155 dB.

Aeroacoustics, low-frequency interferometer, acoustic liners, impedance, resonator with extended neck