DOI: 10.15593/2224-9982/2017.48.09
УДК 534.6:621.45

Е.С. Федотов, О.Ю. Кустов, И.В. Храмцов, В.В. Пальчиковский

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБРАЗЦОВ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Облицовка каналов авиационного двигателя звукопоглощающими конструкциями (ЗПК) является основным способом снижения шума вентилятора двигателя гражданских самолетов. Испытание образцов ЗПК при проектировании конструкции – неотъемлемый этап разработки эффективных ЗПК. Для проведения подобных испытаний необходимо наличие такой установки, как интерферометр с нормальным падением волн. В случае создания нового интерферометра необходимо провести анализ качества его работы. В статье приведены основные этапы такого анализа.

Представлены конструкции нового созданного интерферометра Лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа (ЛМГШиМА) Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ) и функционирующего интерферометра Центра акустических исследований (ЦАИ) ПНИПУ. Описана полуэмпирическая модель определения импеданса ЗПК. Выполнено численное моделирование акустических процессов в интерферометре с образцом ЗПК, основанное на решении методом конечных элементов уравнений Навье–Стокса. Для сокращения вычислительного времени использован образец в виде одного резонатора и с одним отверстием по центру, размеры отверстия соответствуют перфорации 3 %. Данный образец испытан в интерферометрах ЛМГШиМА и ЦАИ, и для него рассчитан импеданс по полуэмпирической модели. Для исключения возможных погрешностей, вносимых конструкцией интерферометров в импеданс, проведены измерения импеданса в интерферометрах без образца в зависимости от высоты воздушной полости. По результатам всех проведенных исследований усовершенствована конструкция интерферометра ЛМГШиМА. Выполненные испытания шести однослойных образцов ЗПК в старом и модифицированном интерферометре ЛМГШиМА и в интерферометре ЦАИ, а также сравнение с полуэмпирической моделью импеданса показали более хорошее качество определения импеданса модифицированным интерферометром ЛМГШиМА.

Ключевые слова: аэроакустика, авиационный двигатель, звукопоглощающие конструкции, интерферометр, импеданс, резонатор Гельмгольца, численное моделирование, уравнения Навье–Стокса, метод конечных элементов.

E.S. Fedotov, O.Yu. Kustov, I.V. Khramtsov, V.V. Palchikovskiy

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

COMPARATIVE ANALYSIS OF ACOUSTICAL INTERFEROMETERS BASED ON EXPERIMENT-CALCULATED RESEARCH OF SOUND-ABSORBING LINER SAMPLES

Treatment of aviation engine ducts by sound-absorbing liners is the main way to reduce fan noise of civil airplane engines. Testing liner samples when designing is integral part of creation of effective liners. To conduct these tests it is necessary availability normal-incidence impedance tube (NIT). In case of new NIT creation, it is necessary to perform operation quality analysis. The article considers basic stages such analysis.

It is presented design of new NIT created in the Laboratory of Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis (LNGMMA) at Perm National Research Polytechnic University (PNRPU) and design of NIT operating in Acoustical Research Center (ARC) at PNRPU. Semiempirical model of liner impedance is described. Numerical simulation of acoustical processes in the NIT with liner sample based on solution of Navier-Stokes equation by finite element method is carried out. To reduce computational time it was used sample as a single resonator with single orifice on center. The orifice dimensions correspond to perforation of 3%. This sample was tested on NITs of LNGMMA and ARC and its impedance was also calculated based on semiempirical model. To exclude possible errors of impedance induced by NITs design it was measured dependences of NIT cavity impedances without liner sample on heights of air cavities. Based on comparative analysis of obtained results it was improved LNGMMA NIT design. The tests of six single-layer liner samples were carried out with old LNGMMA NIT, improved LNGMMA NIT and ARC NIT. Impedances of these liner samples were also calculated based on semiempirical model. The results of improved LNGMMA NIT demonstrate better agreement with ARC NIT and semiempirical model of impedance.

Keywords: aeroacoustics, aircraft engine, liners, interferometer, impedance, Helmholtz resonator, numerical simulation, Navier-Stokes equation, finite element method.

Введение

К звукопоглощающим конструкциям (ЗПК), применяемым для облицовки стенок каналов силовых установок самолетов, выдвигаются высокие требования: они должны иметь минимальную толщину и массу, выдерживать большие давления и температурные колебания, противостоять выдуванию при высоких скоростях газового потока и, конечно, обладать высокой звукопоглощающей способностью. Для обеспечения последнего требования проектирование ЗПК должно сопровождаться экспериментальными исследованиями, подтверждающими соответствие реализуемых акустических характеристик расчетным. Поскольку в каналах авиационного двигателя присутствует обтекание внутренних поверхностей потоком воздуха, то наиболее приближенные условия работы ЗПК реализуются в так называемых установках «канал с потоком».

Тем не менее предварительным этапом перед испытаниями на «канале с потоком» остается проведение эксперимента на интерферометре с нормальным падением волн. Эта первая оценка дает представление об акустической эффективности и качестве изготовления выполненного варианта ЗПК, поэтому измерения на интерферометре должны быть выполнены очень точно. От точности проведения измерения зависит решение о выборе того или иного исполнения облицовки канала авиационного двигателя звукопоглощающими конструкциями.

Следует также отметить, что измерения образцов ЗПК должны проводиться в условиях высоких уровней акустических давлений (140–160 дБ), что характерно для каналов авиационных двигателей. Однако предлагаемые интерферометры от известных мировых производителей виброакустической аппаратуры ориентированы обычно на задачи архитектурной акустики и не позволяют проводить исследования при столь высоких уровнях звука. В результате исследователям ЗПК авиационных двигателей приходится самостоятельно изготавливать необходимые установки, в связи с чем каждый интерферометр является особенной установкой, которая имеет свои уникальные характеристики и требует определенных настроек, от правильности задания которых зависит точность проведения измерений.

Таким образом, при создании новой установки необходимо проводить анализ, который позволит достаточно полно оценить качество разработанного интерферометра и, соответственно, дать заключение о возможности дальнейшего надежного применения интерферометра в исследованиях ЗПК. Логично полагать, что анализ, выполняющий перечисленные требования, должен основываться на сравнении результатов экспериментальных исследований одинаковых образцов ЗПК на разных интерферометрах, а также сравнении их с результатами расчетов. Для получения последних могут использоваться полуэмпирические модели импеданса ЗПК, а также численное моделирование акустических процессов в интерферометре с образцом ЗПК с последующей обработкой результатов для определения импеданса образца. Ниже представлены этапы предлагаемого анализа для оценки качества работы акустического интерферометра с нормальным падением волн.

Интерферометр с нормальным падением волн

Извлечение импеданса в интерферометре с нормальным падением волн широко распространено в связи с относительной простотой реализации эксперимента. Экспериментальная установка представляет собой трубу круглого или квадратного сечения, на одном конце которой располагается образец ЗПК, на другом – динамик, который облучает образец акустическими волнами. Также на некотором расстоянии от образца ЗПК в канале интерферометра заподлицо со стенкой установлены микрофоны, которые записывают акустическое давление падающих и отраженных волн во времени. Далее записанное давление обрабатывается по специальной процедуре, в результате которой вычисляется импеданс образца ЗПК. Обычно для измерений используют два микрофона, поскольку применяемый для определения импеданса «метод передаточной функции» [1] получается наиболее простым для вычислений. В то же время этот ва-

риант можно реализовать при наличии в канале только поршневой моды, что ведет к зависимости частотного диапазона установки от размеров канала импедансной трубы.

Для реализации описанных экспериментов в Лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа (ЛМГШиМА) Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ) был разработан интерферометр с нормальным падением волн (рис. 1, 2).

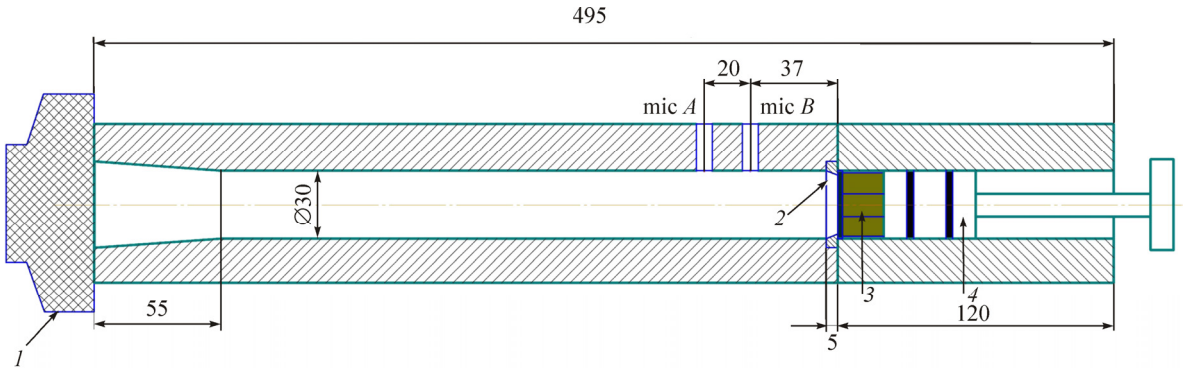


Рис. 1. Внутренний канал интерферометра ЛМГШиМА: *1* – динамик; *2* – шайба, фиксирующая образец; *3* – образец ЗПК; *4* – шток

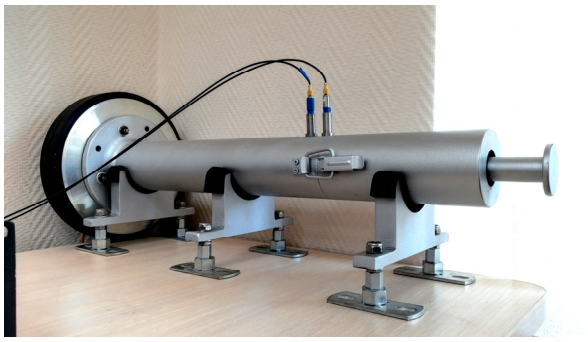


Рис. 2. Укомплектованный и готовый к работе интерферометр ЛМГШиМА

Материал корпуса трубы – сталь. Внутренний диаметр составляет 30 мм и обусловлен тем, что в заданном диапазоне частот необходимо обеспечить экспоненциальное затухание акустических мод высоких порядков. Толщина стенок трубы 13,5 мм. Длина всей установки 495 мм. Благодаря более массивной импедансной трубе установка позволяет реализовать уровни давления 150–160 дБ, что соответствует реальным условиям работы ЗПК в каналах внешнего контура авиационного двигателя. Измерительная часть установки укомплектована аппаратурой фирмы Brüel & Kjær.

Также в экспериментальных исследованиях использовалась другая более ранняя установка, имеющаяся в ПНИПУ, интерферометр с нормальным падением волн Центра акустических исследований (ЦАИ). Данный интерферометр имеет меньший размер, менее массивен и выполнен из алюминиевого сплава. Внутренний диаметр составляет 30 мм, длина всей установки 330 мм. Измерительная часть также укомплектована аппаратурой фирмы Brüel & Kjær. Установка изображена на рис. 3 и 4.

Как видно из рис. 1–4, каждый интерферометр имеет основную часть и часть под образец. Основная часть начинается коническим переходом от динамика к цилиндрическому каналу интерферометра, и попытка ее изготовления в виде цельной детали существенно усложняет изготовление всей установки, что приводит к ее удорожанию. По этой причине в обоих интерферометрах основная часть изготовлена из двух деталей: конической и цилиндрической. В интерфе-

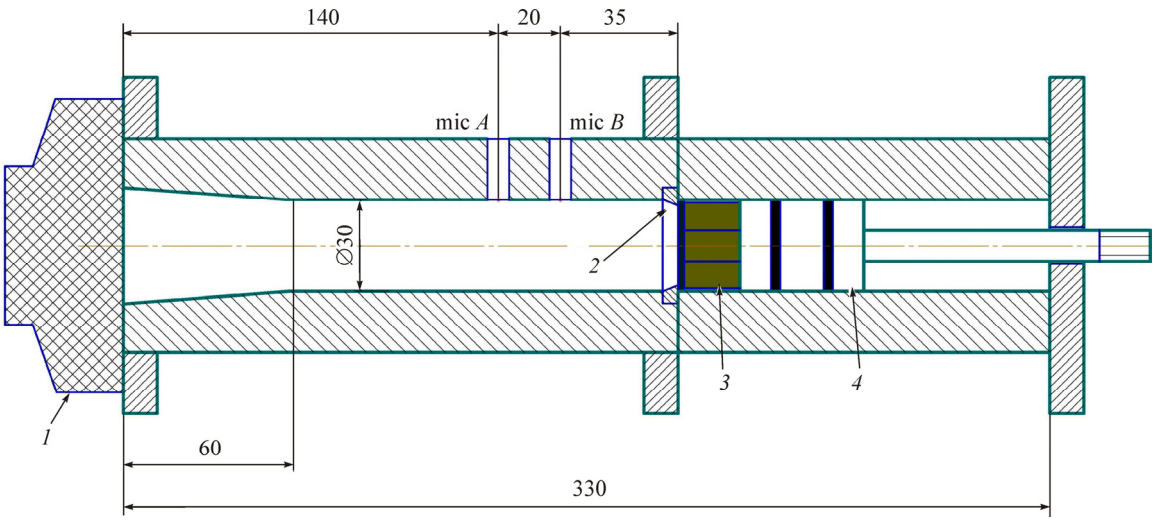


Рис. 3. Внутренний канал интерферометра ЦАИ: *1* – динамик; *2* – шайба, фиксирующая образец; *3* – образец ЗПК; *4* – шток

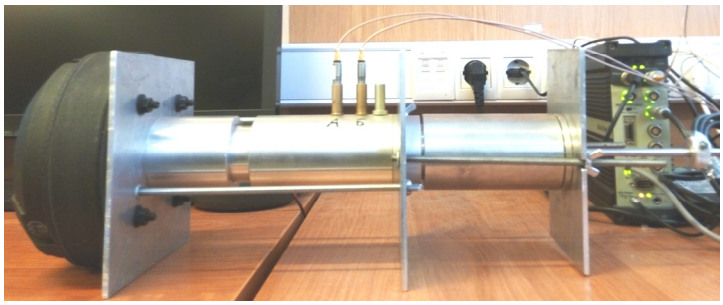


Рис. 4. Укомплектованный и готовый к работе интерферометр ЦАИ

рометре ЛМГШиМА эти детали сварены между собой, а в интерферометре ЦАИ – вставлены в пластины, которые стянуты шпильками. Части под образец отличаются системой их крепления к основной части, опорами, а также фиксацией штока при поджатии образца. Таким образом, отличие конструкций каждого интерферометра может влиять на результат определения импеданса образов ЗПК. Результаты исследований по данному вопросу представлены ниже.

Полуэмпирическая модель импеданса ЗПК

Импеданс связывает между собой давление и нормальную скорость на границе, акустические свойства которой он характеризует. В большинстве работ влияние высоких уровней звукового давления падающей волны описывается через скорость движения частиц среды в отверстии [2–6]. Основой большинства полуэмпирических моделей служат работы Крэндалла и Меллинга. В работе Крэндалла [7] приводится выражение для импеданса круглого отверстия, а в работе Меллинга [8] исследуется влияние высоких уровней звукового давления, которое приводит к нелинейному поведению ЗПК.

Согласно определению, безразмерный удельный акустический импеданс выражается в виде соотношения

$$Z = X + iY = \frac{p}{\rho c u_n}, \tag{1}$$

где p – акустическое давление; ρ – плотность воздуха; c – скорость звука в воздухе; u_n – акустическая скорость.

Несмотря на кажущуюся простоту выражения (1), определение импеданса звукопоглощающей конструкции на практике является сложной задачей. На сегодняшний день предпочтение отдают экспериментальному определению импеданса того или иного образца ЗПК. Использование полуэмпирических теорий импеданса ЗПК характерно для этапа проектирования варианта акустической облицовки внутренних поверхностей мотогондолы авиационного двигателя.

Для сравнения результатов экспериментального определения импеданса ЗПК на интерферометрах с результатами теоретических выкладок предлагается использовать следующий вариант полуэмпирической модели, который показал себя с хорошей стороны в плане простоты и точности.

Импеданс Z можно представить в виде

$$Z = Z_{orifice} + Z_{cavity}, \tag{2}$$

где Z_{cavity} – импеданс соты; $Z_{orifice}$ – импеданс перфорированного листа,

$$Z_{orifice} = \frac{\sqrt{8\nu\omega}}{\sigma c}\left(1 + \frac{t + \delta_{NL}}{d}\right) + \frac{(kd)^2}{8\sigma} + Bv_{rms} + i\frac{\omega(t + \delta_{NL})}{\sigma c}, \tag{3}$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости среды; ω – круговая частота; σ – процент перфорации (в долях); c – скорость звука в среде; d – диаметр отверстий листа; k – волновое число; t – толщина перфорированного листа; v_{rms} – среднеквадратичное значение скорости в отверстии; δ_{NL} – концевая поправка с учетом нелинейных эффектов высокого уровня звукового давления (учитывает сдвиг резонансной частоты за счет высокого уровня звукового давления),

$$\delta_{NL} = \delta\frac{1 + 5000\left(\frac{v_{rms}}{c}\right)^2}{1 + 10000\left(\frac{v_{rms}}{c}\right)^2},$$

δ – концевая поправка для отверстий листа,

$$\delta = 0,65\Phi d,$$

где Φ – функция Фока,

$$\Phi(\sigma) = 1 - 1,47\sqrt{\sigma} + 0,47\sqrt{\sigma^3}.$$

Также в выражении (3)

$$B = \frac{4}{3\pi}\frac{1 - \sigma^2}{\sigma c C_d^2},$$

где C_d – коэффициент сопротивления продуванию по данным исследования [3].

Для учета влияния высоких уровней звукового давления (начиная примерно со 125–130 дБ) необходимо знать значение v_{rms}. Стоит отметить, что изменение действительной части импеданса в зависимости от уровня различно для разных процентов перфорации (образцы с $\sigma = 2...5\,\%$ гораздо более чувствительны к уровню, чем образцы с $\sigma = 10...15\,\%$). Для низких уровней звукового давления (100–115 дБ) можно принять $v_{rms} \approx 0$.

Импеданс соты определяется согласно выражению

$$Z_{cavity} = -i \cdot \mathrm{ctg}(kh),$$

где $i = \sqrt{-1}$; h – высота соты.

Для учета потерь на трение и теплопроводность на стенках трубы необходимо волновые числа k представить в виде

$$k = \frac{\omega}{c} - i\alpha,$$

$$\alpha = \frac{2}{D}\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\rho c^2}}\left(1 + \frac{\gamma - 1}{\sqrt{\mathrm{Pr}}}\right),$$

где D – гидравлический диаметр трубы; μ – динамический коэффициент вязкости; ρ – плотность среды; γ – показатель адиабаты; Pr – число Прандтля.

Численное моделирование процессов в акустическом интерферометре на базе системы линеаризованных уравнений Навье–Стокса

Использование дифференциальных уравнений в частных производных в качестве математической модели и решение их численными методами при оценке акустических свойств ЗПК является довольно распространенным подходом [9–11]. Необходимо выбрать компромисс между полнотой описания физических процессов и трудоемкостью вычислений, что часто представляет собой непростую задачу.

Для получения импеданса с учетом потерь на трение и теплопроводность на стенках образца и измерительной установки была выбрана система линеаризованных уравнений Навье–Стокса. В выбранной системе уравнений все неизвестные имеют гармоническую зависимость от времени, а нелинейные члены отбрасываются в силу высокого порядка малости. Следствием этого является то, что такая система уравнений пригодна для описания поведения ЗПК на низких уровнях звукового давления. Для верификации результатов численного моделирования использовались результаты эксперимента при уровне звукового давления 110 дБ.

Система линеаризованных уравнений Навье–Стокса имеет следующий вид:

$$i\omega\rho + \rho_0\left(\nabla \cdot \boldsymbol{U}\right) = 0,$$

$$i\omega\rho_0\boldsymbol{U} = \nabla \cdot \left(-p\boldsymbol{I} + \mu\left(\nabla\boldsymbol{U} + \left(\nabla\boldsymbol{U}\right)^T\right) - \left(\frac{2\mu}{3} - \mu_B\right)\left(\nabla \cdot \boldsymbol{U}\right)\boldsymbol{I}\right),$$

$$i\omega\rho_0 C_p T = -\nabla \cdot \left(-k\nabla T\right) + i\omega p T_0 \alpha_0 + Q,$$

$$\rho = \rho_0\left(\beta_T p - \alpha_0 T\right).$$

Здесь ρ – плотность; $\boldsymbol{U}$ – вектор колебательной скорости; p – акустическое давление, T – температура; μ – коэффициент динамической вязкости; μ_B – коэффициент объемной вязкости («вторая вязкость»), который принимался равным нулю; C_p – удельная теплоемкость среды при постоянном давлении; k – коэффициент теплопроводности; α – коэффициент теплового расширения; β_T – коэффициент сжимаемости; Q – внешние источники тепловой энергии, которые в нашем случае равны нулю. Неизвестными являются переменные p, $\boldsymbol{U}$, ρ и T, которые описывают акустическое поле. Нулевой индекс относится к установившимся параметрам среды. Граничные условия на стенке выбирались изотермическими, т.е. с заданной температурой (равной температуре окружающей среды) и нулевым вектором скорости (стенка без проскальзывания). На входе задавалось акустическое давление с заданной амплитудой.

Система уравнений решалась методом конечных элементов на неструктурированной сетке в осесимметричной постановке в коммерческом пакете COMSOL, использовался частотный решатель. В точках, где в реальном интерферометре расположены микрофоны, снималось аку-

стическое давление. Далее результаты с шагом 100 Гц обрабатывались по методу «двух микрофонов» и получались значения действительной и мнимой частей импеданса образца.

В силу больших затрат оперативной памяти компьютера для моделирования образцов с несколькими отверстиями был выбран образец с одним отверстием (далее – «тестовый образец»). Диаметр отверстия образца составлял 5 мм, толщина перфорированной стенки 2 мм, высота полости 20 мм, процент перфорации образца составлял 3 %. Фрагмент расчетной области с образцом представлен на рис. 5. Для наилучшего разрешения пристеночных эффектов использовалось измельчение сетки в приграничной зоне.

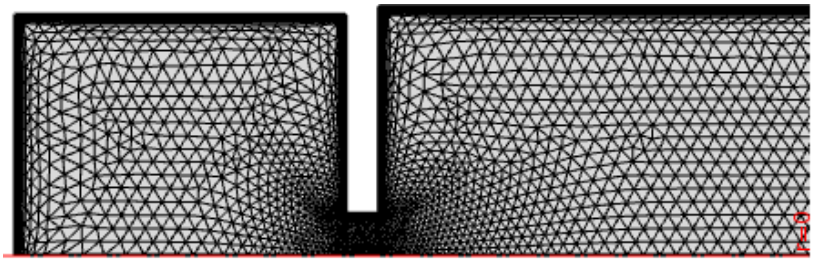


Рис. 5. Фрагмент расчетной области с сеткой конечных элементов

Сравнение результатов испытаний тестового образца на разных интерферометрах с результатами численного моделирования и полуэмпирической модели

Тестовый образец был испытан на интерферометрах ЛМГШиМА и ЦАИ (см. рис. 1–4). При испытаниях на динамик подавался сигнал в виде «белого шума» в определенной полосе частот и выходные сигналы обрабатывались методом «двух микрофонов» [1]. Проводилось сравнение мнимой и действительной частей импеданса образцов с результатами расчетов по полуэмпрической модели. Подобные исследования проводятся в России и за рубежом начиная с середины 1960-х гг. Среди работ по определению импеданса ЗПК стоит отметить статью [12], в которой авторы исследовали влияние геометрических параметров на акустический импеданс при испытании на интерферометре и «канале с потоком». В связи с отсутствием данных о скорости в отверстиях образцов сравнение с результатами полуэмпирической модели проводилось при уровне звукового давления 110 дБ.

Результаты физического эксперимента на интерферометрах ЛМГШиМА и ЦАИ, расчета по полуэмпирической модели и численного моделирования представлены на рис. 6 и 7.

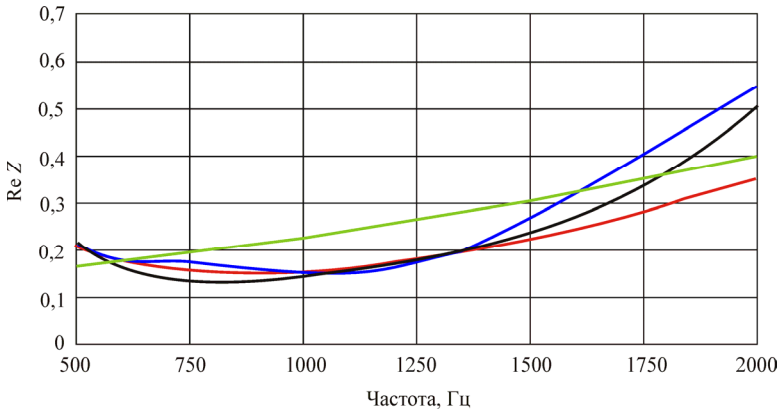


Рис. 6. Действительная часть импеданса тестового образца: —— – интерферометр ЛМГШиМА; —— – интерферометр ЦАИ; —— – полуэмпирическая модель; —— – численное моделирование

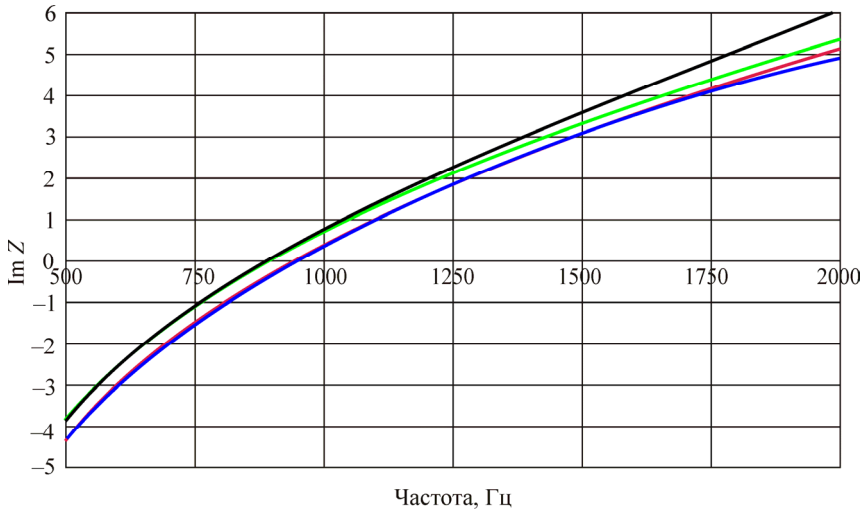


Рис. 7. Мнимая часть импеданса тестового образца: —— – интерферометр ЛМГШиМА; —— – интерферометр ЦАИ; —— – полуэмпирическая модель; —— – численное моделирование

Видно, что результаты физического эксперимента на двух установках качественно и количественно совпадают по действительной части примерно до 1500 Гц, а ближе к 2000 Гц наблюдается заметное расхождение между двумя установками. По мнимой части импеданса результаты от двух установок качественно и количественно очень хорошо совпадают. Результаты численного моделирования методом конечных элементов неплохо совпадают с результатами эксперимента на двух установках, что говорит о правомерности численного подхода в оценке поведения образцов ЗПК. Расчет по полуэмпирической модели дает хорошее совпадение с экспериментом только по мнимой части импеданса, по действительной части импеданса можно говорить только о приближенной оценке. Несмотря на удовлетворительные результаты полуэмпирической модели, простота получения оценочных значений импеданса с помощью полуэмпирических соотношений для того или иного образца является сильным преимуществом такого подхода.

Поле скорости движения среды в окрестности горла представлено на рис. 8. Результат приведен для частоты 900 Гц, которая близка к резонансной частоте для данного образца (944 Гц по результатам испытаний на интерферометрах, 901 Гц по результатам расчета по полуэмпирической модели).

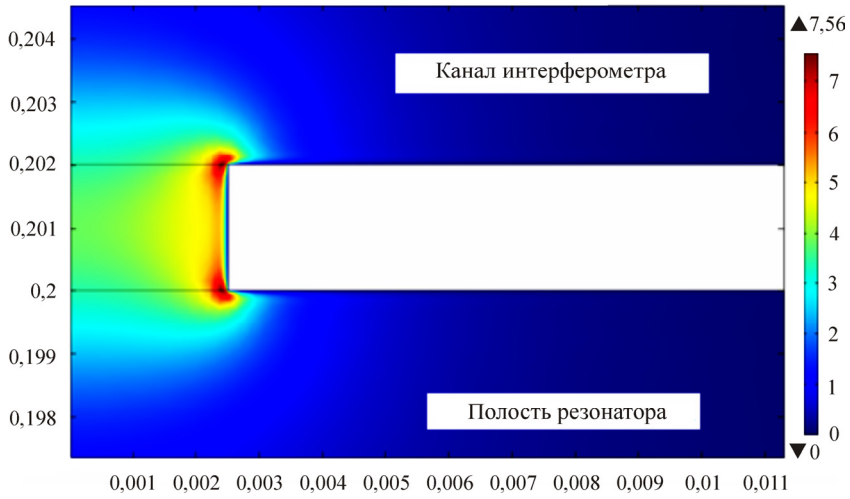


Рис. 8. Поле скорости в окрестности отверстия

На резонансе наблюдается максимальное значение скорости на кромках горла 7,56 м/с (среднее значение по площади отверстия 4,08 м/с) при амплитуде давления на входе в трубу 20 Па. Увеличение амплитуды давления на входе в трубу не приводит к качественному изменению поля скоростей, получаемого в численном моделировании, что не соответствует реально наблюдаемой в эксперименте картине. В действительности увеличение амплитуды давления на входе приводит к интенсивному вихреобразованию в области отверстия и отрыву этих вихрей с кромок отверстия [9]. Для описания подобных эффектов необходимо использовать систему уравнений Навье–Стокса без линеаризации, хотя данный подход приводит к увеличению времени расчета и усложняет обработку результатов для получения импеданса образца.

Экспериментальные исследования интерферометров ЛМГШиМА и ЦАИ

Для определения влияния самой измерительной установки на значения импеданса образца ЗПК необходимо провести сравнение значений импеданса при отсутствии образца в установках. Самой тематике поглощения звука в трубах уделено немало внимания. Одной из основополагающих работ в этом направления является исследование [13]. Механизм поглощения акустической энергии за счет теплопроводности подробно описан в работе [14]. Несмотря на малые изменения температуры среды за счет звуковой волны, вблизи стенки градиент температуры достигает значительной величины. Сравнительный анализ двух акустических интерферометров приведен в исследовании [15], что еще раз подтверждает актуальность задачи по изучению повторяемости экспериментальных данных.

В данной работе проводилось сравнение экспериментальных результатов импеданса в зависимости от высоты воздушной полости h в двух разных установках (интерферометры ЛМГШиМА и ЦАИ) с результатами численного моделирования на базе решения методом конечных элементов системы линеаризованных уравнений Навье–Стокса. Полученные результаты показаны на рис. 9 и 10.

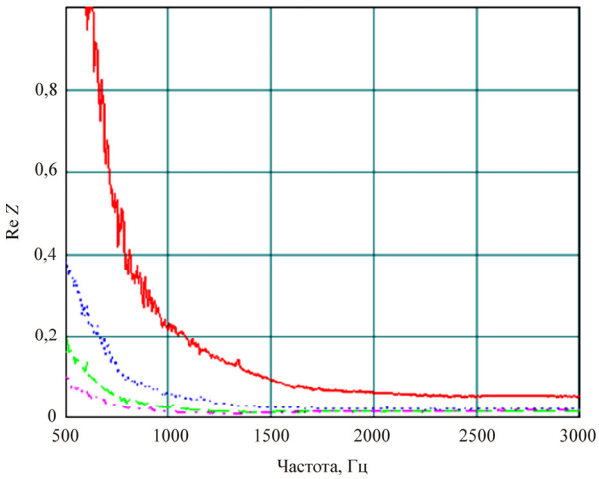


Рис. 9. Действительная часть импеданса в зависимости от высоты полости h (интерферометр ЦАИ): – h = 10 мм; – h = 20 мм; – h = 30 мм; – h = 40 мм

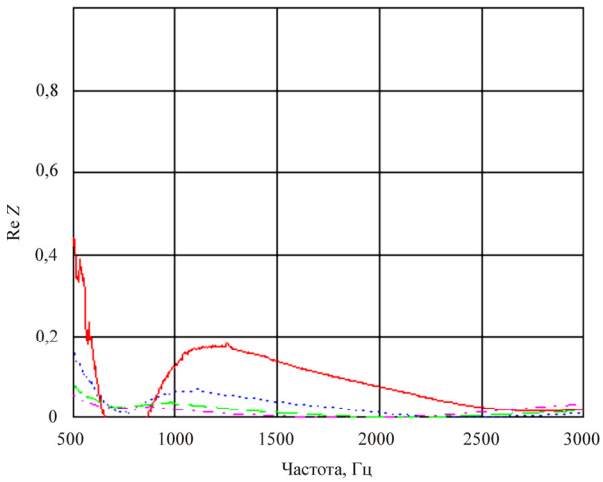


Рис. 10. Действительная часть импеданса в зависимости от высоты полости h (интерферометр ЛМГШиМА): – h = 10 мм; – h = 20 мм; – h = 30 мм; – h = 40 мм

Из представленных графических зависимостей видно, что действительная часть импеданса увеличивается при уменьшении высоты полости. Результаты измерений установок в ЦАИ и ЛМГШиМА сильно различаются даже по характеру поведения графиков. Видно, что различные установки имеют разный характер поглощения, что, в свою очередь, будет сказываться на результатах испытаний образцов. Это свидетельствует о влиянии конструктивных особенностей

интерферометров, либо условия проведения экспериментов сильно различались. В связи с этим было проведено численное моделирование на базе системы линеаризованных уравнений Навье–Стокса. Результаты расчета представлены на рис. 11.

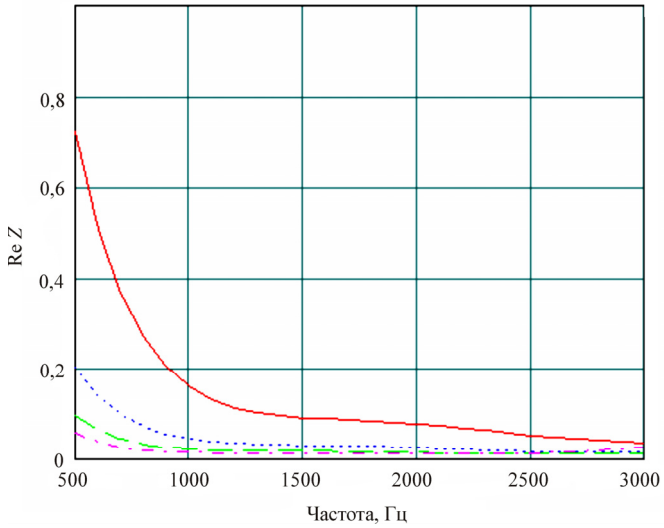


Рис. 11. Действительная часть импеданса в зависимости от высоты полости *h* (численное моделирование): — – *h* = 10 мм; ···· – *h* = 20 мм; — – *h* = 30 мм; - · - – *h* = 40 мм

Результаты численного моделирования качественно совпадают с результатами экспериментов в интерферометре ЦАИ (см. рис. 9, 11). В области частот выше 1000 Гц можно с уверенностью сказать и о количественном совпадении полученных результатов. Данное обстоятельство позволяет заключить, что интерферометр ЦАИ при его имеющейся конструкции функционирует правильно, а количественные расхождения между экспериментом и численным моделированием можно объяснить недостаточным учетом всех факторов математической модели, которая была принята при проведении численного моделирования.

В свою очередь, качественное различие результатов эксперимента и численного моделирования в интерферометре ЛМГШиМА (см. рис. 10, 11) привело к выводу, что на данные результаты влияет не только правильный учет всех факторов математической модели, но и конструкция интерферометра. По сравнению с интерферометром ЦАИ, в интерферометре ЛМГШиМА вызывало озабоченность качество поджатия образца, поэтому часть под образец была переделана. Новая конструкция интерферометра ЛМГШиМА имеет следующие отличия от старой: изменен корпус, шток и добавлена направляющая втулка (рис. 12, поз. *5*); также в качестве материала использовался алюминиевый сплав. Доработанный и готовый к работе интерферометр представлен на рис. 13.

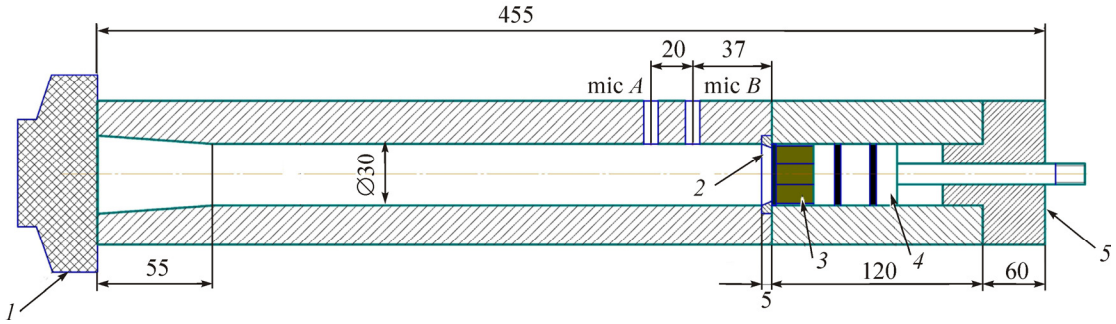


Рис. 12. Внутренний канал нового интерферометра ЛМГШиМА: *1* – динамик; *2* – шайба, фиксирующая образец; *3* – образец ЗПК; *4* – шток; *5* – направляющая втулка

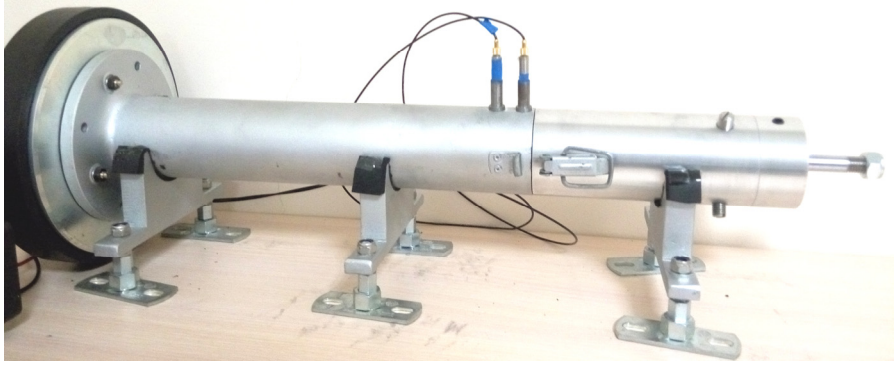


Рис. 13. Интерферометр ЛМГШиМА после модернизации

Модифицированный интерферометр был проверен на испытаниях шести образцов ЗПК, которые также были испытаны на старом интерферометре ЛМГШиМА, интерферометре ЦАИ; по полуэмпирической модели был построен импеданс образцов. Геометрические характеристики образцов представлены в таблице.

Геометрические характеристики образцов

Номер образца	*d*, мм	*t*, мм	*h*, мм	σ, %
1	1,4	1	19	10,2
2	1,4	1	19	8,1
3	1,3	1	19	5,1
4	1,3	1	19	3,9
5	2	0,5	19	15,6
6	2	0,5	19	6,2

Испытания шести образцов ЗПК на интерферометре ЛМГШиМА с новой конструкцией показали хорошее совпадение с результатами интерферометра ЦАИ во всем используемом диапазоне частот (от 500 до 3000 Гц) на всех образцах (рис. 14–19).

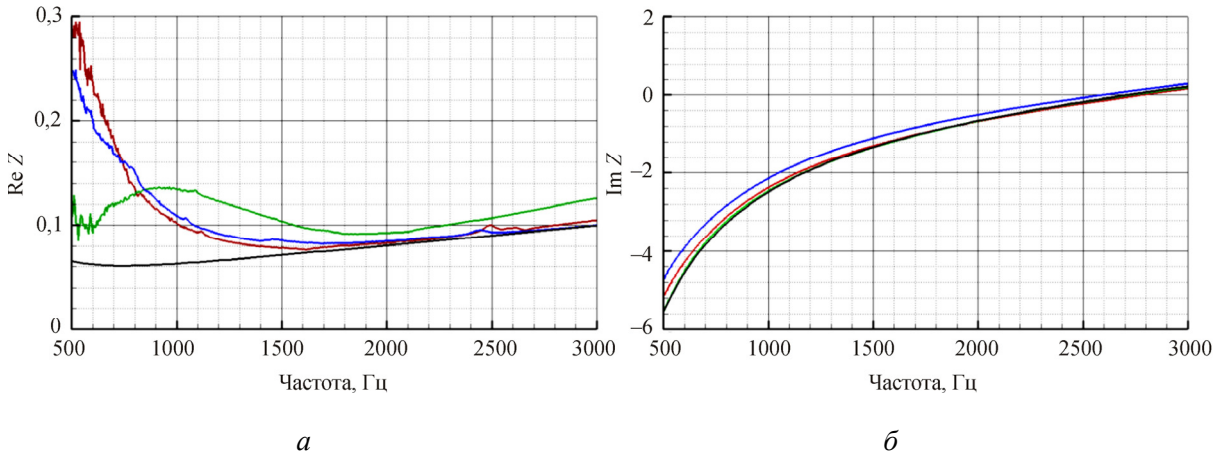
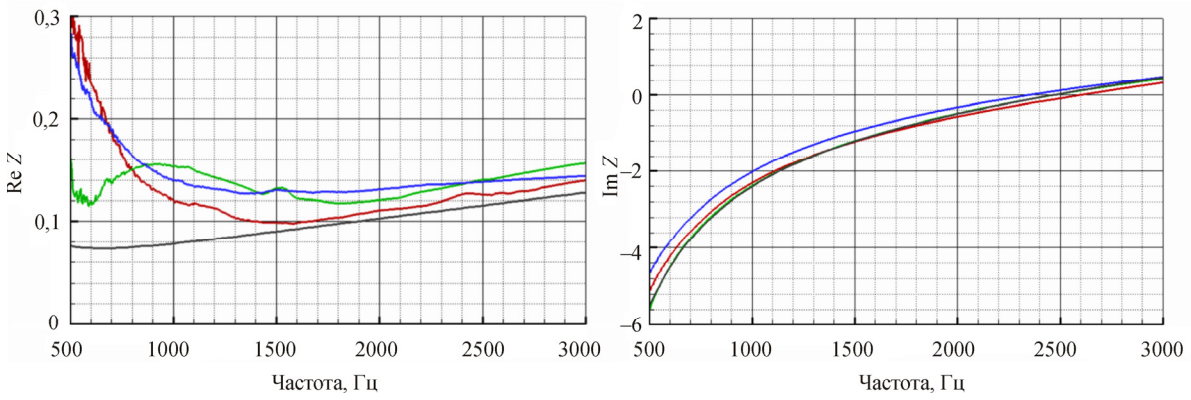
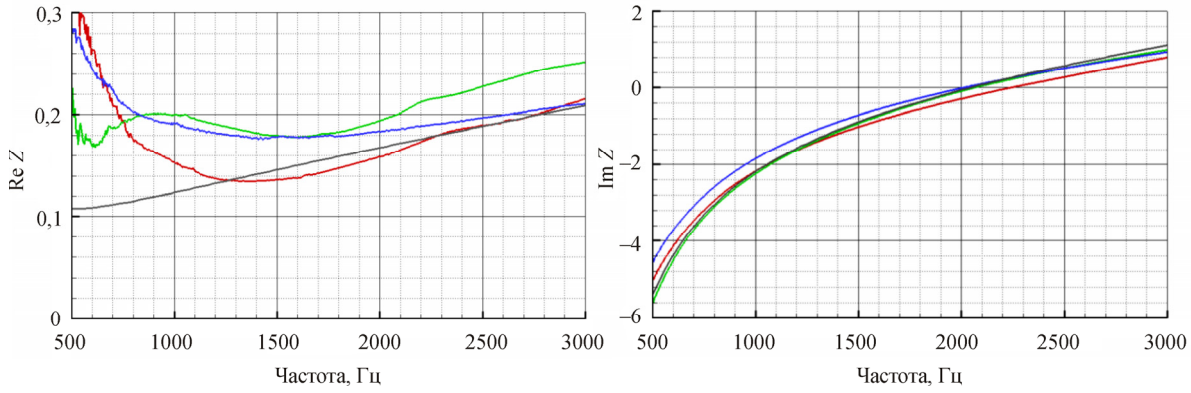


Рис. 14. Импеданс образца № 1: *а* – действительная часть; *б* – мнимая часть; ЦАИ; ЛМГШиМА (старый интерферометр); ЛМГШиМА (новый интерферометр); полуэмпирическая модель



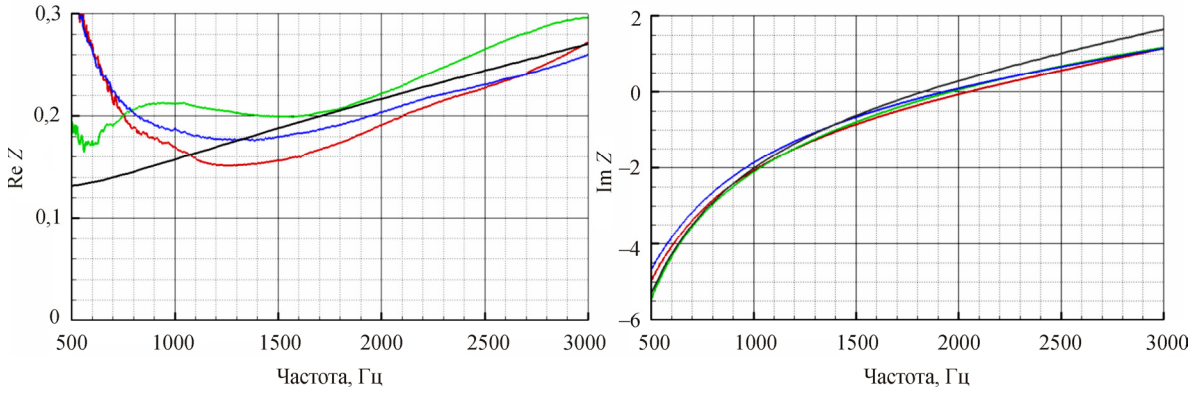
а *б*

Рис. 15. Импеданс образца № 2: *а* – действительная часть; *б* – мнимая часть; ЦАИ; ЛМГШиМА (старый интерферометр); ЛМГШиМА (новый интерферометр); полуэмпирическая модель



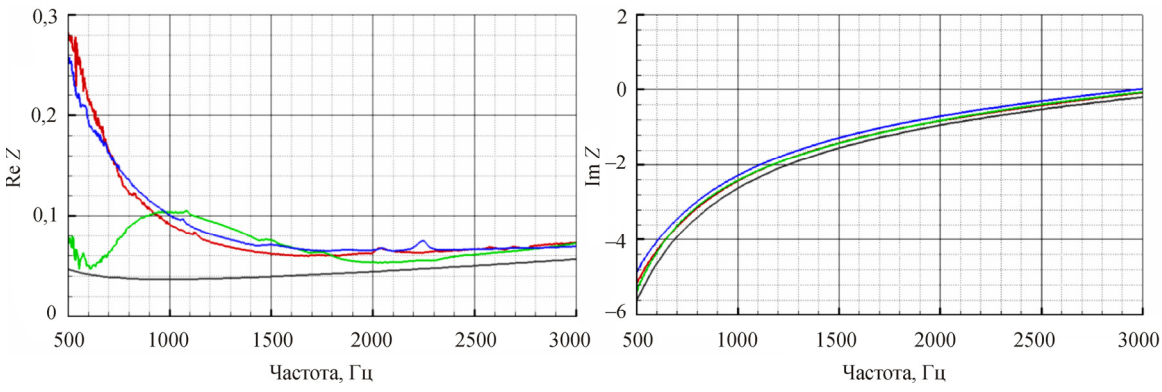
а *б*

Рис. 16. Импеданс образца № 3: *а* – действительная часть; *б* – мнимая часть; ЦАИ; ЛМГШиМА (старый интерферометр); ЛМГШиМА (новый интерферометр); полуэмпирическая модель



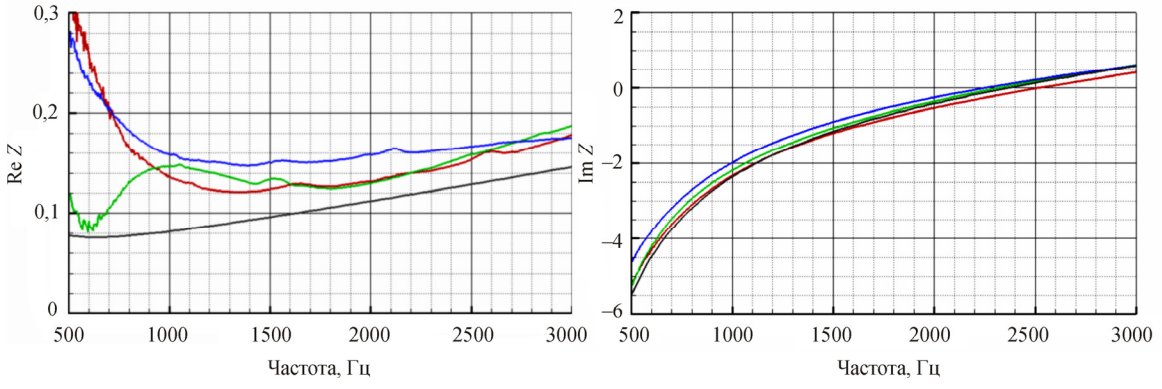
а *б*

Рис. 17. Импеданс образца № 4: *а* – действительная часть; *б* – мнимая часть; ЦАИ; ЛМГШиМА (старый интерферометр); ЛМГШиМА (новый интерферометр); полуэмпирическая модель



а *б*

Рис. 18. Импеданс образца № 5: *а* – действительная часть; б – мнимая часть; ЦАИ; ЛМГШиМА (старый интерферометр); ЛМГШиМА (новый интерферометр); полуэмпирическая модель



а *б*

Рис. 19. Импеданс образца № 6: *а* – действительная часть; *б* – мнимая часть; ЦАИ; ЛМГШиМА (старый интерферометр); ЛМГШиМА (новый интерферометр); полуэмпирическая модель

Таким образом, можно заключить, что модифицированный интерферометр имеет приемлемое качество определения импеданса ЗПК.

Заключение

В работе было показано, что существующие подходы при определении импеданса ЗПК демонстрируют некоторое различие полученных результатов. Отмечается разброс, который встречается от установки к установке, что является важным результатом данного исследования. Кроме того, продемонстрировано, что, выполняя сравнительный анализ экспериментальных исследований на разных интерферометрах с результатами численного моделирования и полуэмпирических моделей, можно не только определить акустические характеристики звукопоглощающей конструкции, но и оценить качество работы интерферометра и сделать заключение о необходимости модификации тех или иных узлов установки. Данный подход позволил усовершенствовать конструкцию интерферометра ЛМГШиМА, дальнейшие измерения на котором продемонстрировали значительно лучшее совпадение результатов испытаний образцов ЗПК с результатами интерферометра ЦАИ, который ранее показал хорошее качественное и количественное совпадение с результатами численного моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ по договору № 14.Z50.31.0032.

Библиографический список

1. Chung J.Y., Blaser D.A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory. II. Experiment // Journal of the Acoustical Society of America. – 1980. – Vol. 68, № 3. – P. 907–921.

2. Acoustic impedance measurement with grazing flow / C. Malmary, S. Carbonne, Y. Auregan, V. Pagneux // 7th AIAA/CEAS Conference, 28–30 May 2001, Maastricht. – AIAA Paper. – 2001. – № 2001–2193.

3. Соболев А.Ф. Полуэмпирическая теория однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций с лицевой перфорированной панелью // Акустический журнал. – 2007. – Т. 53, № 6. – С. 861–872.

4. Elnady T., Boden H. On the modeling of the acoustic impedance of perforates with flow // AIAA Paper. – 2003. – № 2003–3304.

5. Yu J., Ruiz M., Kwan H.W. Validation of Goodrich perforate liner impedance model using NASA Langley test data // AIAA Paper. – 2008. – № 2008–2930.

6. Мунин А.Г., Кузнецов В.М., Леонтьев В.Е. Аэродинамические источники шума. – М.: Машиностроение, 1981. – 248 с.

7. Crandall I. Theory of vibrating systems and sound. – New York: D. Van Nostrand & Co. Inc., 1927.

8. Melling T. The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure levels // Journal of Sound and Vibration. – 1973. – Vol. 29, iss. 1. – P. 1–65.

9. Fedotov E.S., Khramtsov I.V., Kustov O.Yu. Numerical simulation of the processes in the normal incidence tube for high acoustic pressure levels // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1770, № 030120. – 7 p.

10. Федотов Е.С., Пальчиковский В.В. Исследование работы резонатора Гельмгольца в волноводе прямоугольного сечения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 38. – С. 107–126.

11. Na W., Boij S., Efraimsson G. Simulations of acoustic wave propagation in an impedance tube using a frequency-domain linearized Navier-Stokes solver // 20th AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference, Atlanta. – AIAA Paper. – 2014. – № 2014–2960.

12. Effects of liner geometry on acoustic impedance / M.G. Jones, M.B. Tracy, W.R. Watson, T.L. Parrott // AIAA Paper. – 2002. – № 2002–2446.

13. Tijdeman H. On the propagation of sound waves in cylindrical tubes // Journal of Sound and Vibration. – 1975. – Vol. 39, iss. 1. – P. 1–33.

14. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособие: в 10 т. Т. 6. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – 736 с.

15. Schultz T., Liu F., Cattafesta L., Sheplak M., Jones M. A comparison study of normal-incidence acoustic impedance measurements of a perforate liner // 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30th AIAA Aeroacoustics Conference). AIAA Paper. – 2009. – № 2009–3301.

References

1. Chung J.Y., Blaser D.A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory. II. Experiment. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, vol. 68, no. 3, pp. 907-921.

2. Malmary C., Carbonne S., Auregan Y., Pagneux V. Acoustic impedance measurement with grazing flow. *AIAA Paper 2001-2193, 7th AIAA/CEAS Conference*, 28-30 May 2001, Maastricht, Netherlands.

3. Sobolev A.F. A semiempirical theory of a one-layer cellular sound-absorbing lining with a perforated face panel. *Acoustical Physics*, 2007, vol. 56, iss. 6, pp 762-771.

4. Elnady T., Boden H. On the modeling of the acoustic impedance of perforates with flow. *AIAA Paper*, 2003, no. 2003-3304.

5. Yu J., Ruiz M., Kwan H.W. Validation of Goodrich perforate liner impedance model using NASA Langley test data. *AIAA Paper*, 2008, no. 2008-2930.

6. Munin A.G., Kuznetsov V.M., Leontev V.E. Aerodinamicheskie istochniki shuma [Aerodynamic sources of noise]. Moscow, Mashinostroenie, 1981, 248 p.

7. Crandall I. Theory of vibrating systems and sound. New York: D. Van Nostrand & Co. Inc., 1927.

8. Melling T. The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure levels. *Journal of Sound and Vibration*, 1973, vol. 29, iss. 1, pp. 1-65.

9. Fedotov E.S., Khramtsov I.V., Kustov O.Yu. Numerical simulation of the processes in the normal incidence tube for high acoustic pressure levels. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1770, no. 030120, 7 p.

10. Fedotov E.S., Palchikovskiy V.V. Issledovanie raboty rezonatora Gelmgoltsa v volnovode pryamougolnogo secheniya [A study of Helmholtz resonator operation in rectangular cross-section waveguide]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2014, no. 38, pp. 107-126.

11. Na W., Boij S., Efraimsson G. Simulations of acoustic wave propagation in an impedance tube using a frequency-domain linearized Navier-Stokes solver. *20th AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference*, Atlanta, Georgia. *AIAA Paper*, 2014, no. 2014-2960.

12. Jones M.G., Tracy M.B., Watson W.R., Parrott T.L. Effects of liner geometry on acoustic impedance. *AIAA Paper*, 2002, no. 2002-2446.

13. Tijdeman H. On the propagation of sound waves in cylindrical tubes. *Journal of Sound and Vibration*, 1975, vol. 39, iss. 1, pp. 1-33.

14. Landau L.D., Lifshits E.M. Teoreticheskaya fizika. Tom 6: Gidrodinamika [Theoretical physics. Vol. 6: Hydrodynamics]. Moscow, Nauka, 1988, 736 p.

15. Schultz T., Liu F., Cattafesta L., Sheplak M., Jones M. A comparison study of normal-incidence acoustic impedance measurements of a perforate liner. *15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference* (30th AIAA Aeroacoustics Conference). *AIAA Paper*, 2009, no. 2009-3301.

Об авторах

Федотов Евгений Сергеевич (Пермь, Россия) – магистр кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», инженер Лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: tesla.prog@rambler.ru).

Кустов Олег Юрьевич (Пермь, Россия) – магистр кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», инженер Лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: kustovou@yandex.ru).

Храмцов Игорь Валерьевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», младший научный сотрудник Лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: igorhrs92@mail.ru).

Пальчиковский Вадим Вадимович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: vvpal@bk.ru).

About the authors

Evgeniy S. Fedotov (Perm, Russian Federation) – Master, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Engineer of Laboratory of Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: tesla.prog@rambler.ru).

Oleg Yu. Kustov (Perm, Russian Federation) – Master, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Engineer of Laboratory of Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: kustovou@yandex.ru).

Igor V. Khramtsov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Junior Researcher of Laboratory of Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: igorhrs92@mail.ru).

Vadim V. Palchikovskiy (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: vvpal@bk.ru).

Получено 03.02.2017