АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2018, том 64, № 4, с. 508–514

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

УДК 534.8.081.7

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ГАШЕНИЯ ЗВУКА В ЯЧЕЙКЕ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

© 2018 г. И. В. Храмцов[a], *, О. Ю. Кустов[a], Е. С. Федотов[a], А. А. Синер[a]

[a] *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
614990 Пермь, Комсомольский просп. 29, Россия
**e-mail: lmgsh@pstu.ru*

Поступила в редакцию 16.08.201 г.

Численное моделирование акустических процессов в интерферометре при высоких уровнях акустического давления представляет собой один из способов исследования процессов снижения шума образцами звукопоглощающих конструкций (ЗПК). В ходе исследований использовался образец ЗПК, представляющий собой одиночный резонатор Гельмгольца круглой формы. Исследования проводились при уровнях звукового давления 110, 130, 140 и 150 дБ. За основу были взяты результаты, полученные на интерферометре с нормальным падением волн. При расчетах использовались системы линеаризованных и полных уравнений Навье–Стокса. Результаты, полученные с помощью линеаризованных уравнений Навье–Стокса, позволяют достаточно точно определить акустические характеристики образца на линейных режимах работы. Использование полной системы уравнений Навье–Стокса с учетом сжимаемости позволило получить хорошее качественное и количественное совпадение с экспериментом при высоких уровнях акустического давления.

Ключевые слова: аэроакустика, авиационный двигатель, звукопоглощающие конструкции, интерферометр, импеданс, резонатор Гельмгольца, уравнения Навье–Стокса

DOI: 10.1134/S032079191804007X

ВВЕДЕНИЕ

Шум, генерируемый вентилятором, распространяется по внешним контурам авиационного двигателя, и для его подавления стенки каналов облицовываются звукопоглощающими конструкциями (ЗПК), как правило, резонансного типа. При высоких уровнях звукового давления, реализующихся во время работы авиадвигателей, такие конструкции работают на нелинейном режиме. Применение численного моделирования позволяет создавать новые полуэмпирические модели зависимости импеданса от уровня звукового давления, спектральных характеристик сигнала и геометрических параметров ЗПК. Существующий уровень вычислительной техники, однако, позволяет проводить расчеты только для малых образцов конструкций, состоящих из одного или нескольких резонаторов Гельмгольца [1–9].

В данной работе рассматривается работа одиночной ячейки ЗПК с помощью экспериментальных и расчетных методов. Рассматривается работа такой ячейки на линейном и нелинейном режимах работы при нормальном падении акустической волны, и проводится выбор метода численного расчета, который может с достаточной точностью воспроизвести процессы в интерферометре на таких режимах работы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ

Для проведения экспериментальных исследований в Лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа (ЛМГШиМА) ПНИПУ была разработана установка –интерферометр с нормальным падением волн [10–12]. Геометрия и внешний вид установки представлены на рис. 1 и 2. Акустические характеристики образца ЗПК определяются в интерферометре на основе двухмикрофонного метода [13, 14]. Стоит отметить, что у данного интерферометра микрофоны располагаются достаточно близко к образцу, и при исследовании одиночного образца на высоких уровнях звукового давления на них может воздействовать не только акустическое давление в канале, но и гидродинамические пульсации давления от вихрей, выходящих в канал из горла резонатора. Поэтому результат измерения импеданса при высоких уровнях звукового давления на данном интерферометре может иметь высокую неопределенность.

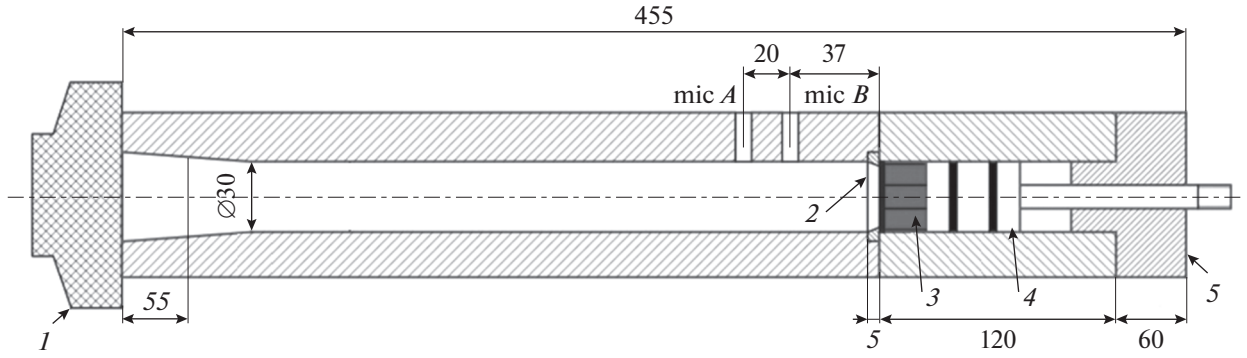

Рис. 1. Продольный разрез интерферометра ЛМГШиМА: *1* – динамик, *2* – шайба, фиксирующая образец, *3* – образец ЗПК, *4* – шток, *5* – направляющая втулка.

В качестве объекта исследования рассматривается образец ЗПК, помещенный в акустический интерферометр, используемый для измерения акустических характеристик (импеданс, коэффициент поглощения). Образец создан с помощью метода 3D-печати и представляет собой одиночный резонатор Гельмгольца. Характеристики образца представлены в таблице, его конструкция – на рис. 3.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТАНОВКИ И ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе для решения задачи определения импеданса одиночной ячейки ЗПК использовалась система линеаризованных и полных уравнений Навье–Стокса. Решение с помощью линеаризованных уравнений Навье–Стокса проводилось в программном комплексе COMSOL Multifisics методом конечных элементов в осесимметричной постановке с помощью частотного решателя. Расчеты с использованием полной системы Навье–Стокса проводились в программном комплексе Fluent методом конечных объемов в осесимметричной и трехмерной постановках.

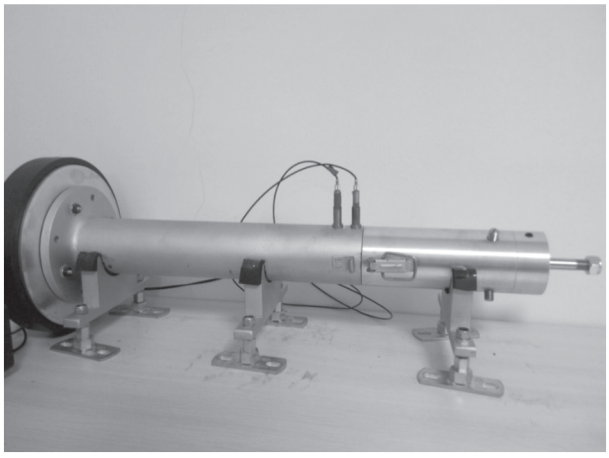

Рис. 2. Общий вид интерферометра ЛМГШиМА.

Расчетная геометрическая модель включала в себя воздушный объем внутри интерферометра и воздушный объем внутри резонатора с одиночным отверстием. При выполнении осесимметричного расчета длина воздушного объема интерферометра от динамика до образца составляла 250 мм. Использовалась подробная сетка, состоящая из прямоугольных элементов со средним линейным размером элемента 0.5 мм и сгущением на стенке из 20 слоев с коэффициентом роста 1.2. Размер пристеночной ячейки 5×10^{-3} мм. Полученная расчетная сетка для осесимметричного расчета состояла из 33 тысяч расчетных ячеек. Для экономии расчетных ресурсов при трехмерной постановке использовалась меньшая длина расчетной области – 120 мм и больший средний линейный размер элемента сетки – 1 мм. Сетка для трехмерного расчета состояла из 300 тысяч гексаэдральных элементов. При выполнении расчетов использовались численные схемы второго порядка точности по времени и по пространственным переменным.

Схема расчетной области представлена на рис. 4, где показаны характерные размеры образца ЗПК, расположение микрофонов для измерения импеданса, а также характерные поверхности S_1 – сечение источника (динамик), где реализуется случайное возбуждение, и S_2 – жесткая поверхность трубы и образца, где происходит прилипание частиц среды. При расчетах стенки трубы принимаются теплоизолированными. Все расчеты проводились при нормальных начальных условиях.

При расчете на основе линеаризованных уравнений Навье–Стокса в Comsol Multifisics использовались следующие граничные условия:

$$\mathbf{v}|_{S_2} = \mathbf{0}, \quad p|_{S_1} = P(f), \quad T|_{S_1} = 300 \text{ K},$$

где $\mathbf{v}|_{S_2}$ – скорость на стенке интерферометра; $p|_{S_1}$ и $T|_{S_1}$ – давление и температура на входном сечении; $P(f)$ – частотная функция давления с шагом

Таблица 1. Размеры резонатора Гельмгольца

Параметр	Значение
Толщина перфорированного листа g, мм	2
Процент перфорации F	3%
Диаметр отверстия d, мм	5
Высота образца H, мм	20
Наружный диаметр образца D, мм	30
Внутренний диаметр образца, $D_{вн}$, мм	29

10 Гц в частотном диапазоне 500–2000 Гц с амплитудой, соответствующей давлению на микрофонах 110 и 130 дБ.

При расчете с помощью полной системы Навье–Стокса в Ansys Fluent использовались следующие граничные условия:

$$\mathbf{v}|_{S_2} = \mathbf{0}, \quad p|_{S_1} = P_{\text{rand}}(t), \quad T|_{S_1} = 300 \text{ K},$$

где $P_{\text{rand}}(t)$ – временная функция с равномерным частотным спектром в заданном диапазоне частот 500–3600 Гц. Плотность определяется по заданным давлению и температуре из уравнения состояния совершенного газа. Отраженные от образца звуковые волны выходят из расчетной области через сечение динамика S_1.

В работе [15] показано влияние типа сигнала на свойства образцов ЗПК, в связи с этим в расчет был заложен сигнал, взятый непосредственно из эксперимента. На рис. 5а представлена зависи-

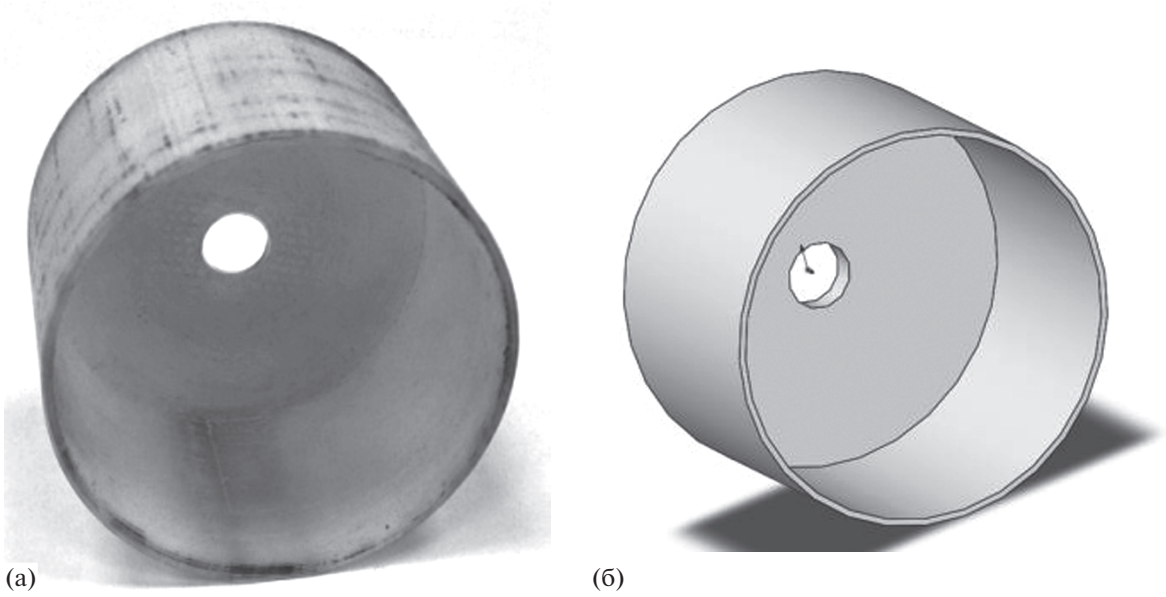

Рис. 3. Образец и его 3D-модель.

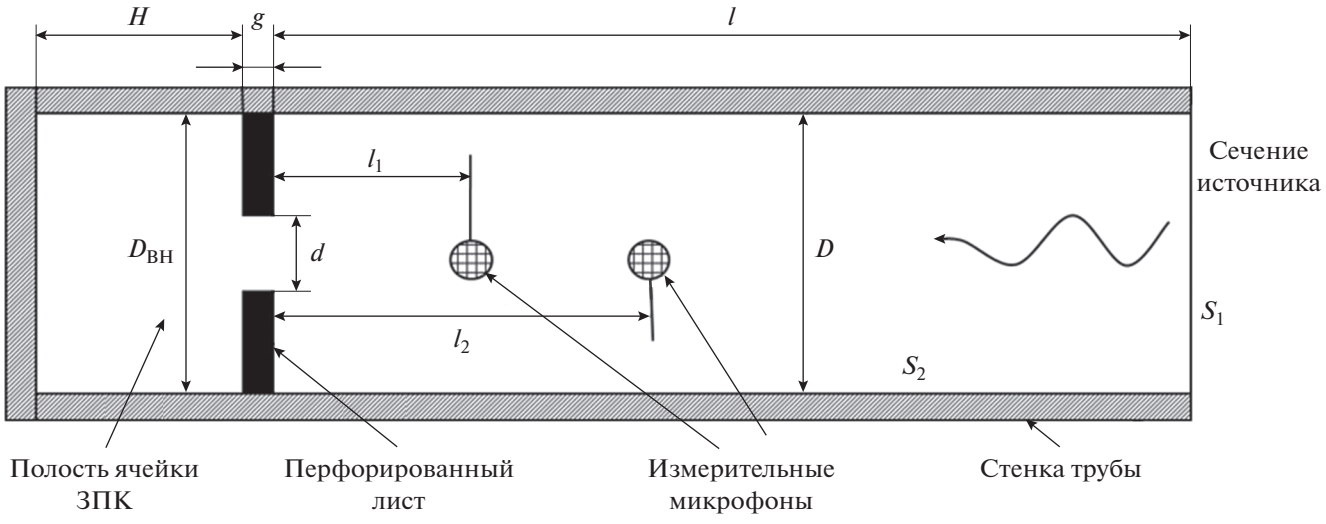

Рис. 4. Схема расчетной области.

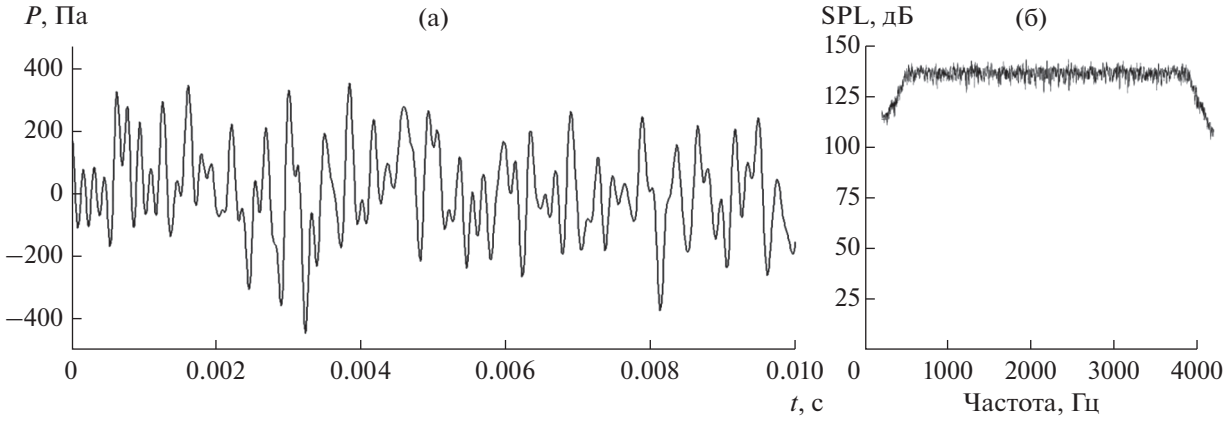

Рис. 5. Генерируемый сигнал при эксперименте на 140 дБ: (а) временная зависимость, (б) спектр сигнала.

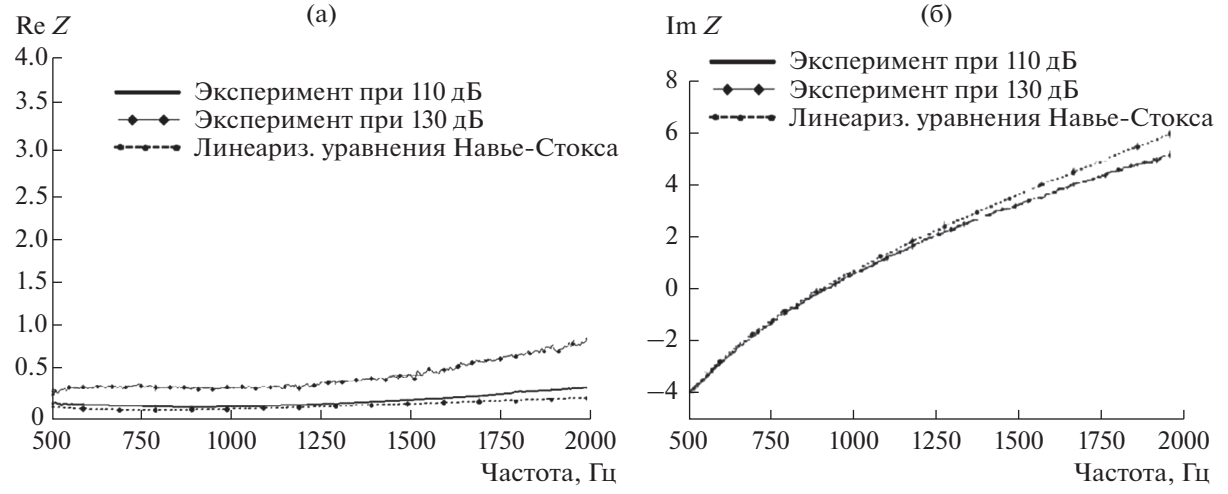

Рис. 6. Импеданс ячейки ЗПК при уровне звукового давления 110 и 130 дБ, полученный с использованием системы линеаризованных уравнений Навье–Стокса: (а) действительная часть, (б) мнимая часть.

мость давления $P_{\text{rand}}(t)$ от времени для сигнала с суммарным уровнем 140 дБ, на рис. 5б показан спектр данного сигнала. Сигнал в зависимости от времени представляет собой случайный сигнал с равномерным спектром в диапазоне частот от 500 до 3600 Гц и суммарным уровнем звукового давления 130, 140 и 150 дБ.

Для вычисления импеданса записываются сигналы давления в контрольных точках (микрофонах) $p_1(t), p_2(t)$. Микрофоны располагаются на расстояниях 37 и 57 мм от образца, их расположение показано на рис. 5. При проведении расчетов акустическое давление определяется на стенке интерферометра в точках, соответствующих центральной оси установки микрофона. По записанным сигналам давления вычисляются акустические характеристики ЗПК.

При расчете с помощью полной системы уравнений Навье–Стокса записанные в точках сигналы разбивались на сегменты, обрабатывались с помощью быстрого преобразования Фурье над отдельными сегментами, и полученные спектры усреднялись. Усреднение выполнялось с учетом перекрытия соседних сегментов на 66%, при вычислении спектров использовалась оконная функция Ханнинга. Число временных отсчетов сигнала при численном моделировании составляло 200000 для осесимметричной постановки и 50000 для трехмерной. Размер сегментов для осесимметричной и трехмерной постановок составлял 8192 отсчетов. Шаг по времени составлял 5×10^{-6} с для осесимметричной и 2×10^{-5} с для трехмерной постановки.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 8 представлен импеданс одиночной ячейки ЗПК, полученный с помощью линеаризованной системы Навье–Стокса. Расчеты проводились для двух уровней сигнала – 110 и 130 дБ. Как можно увидеть, получено хорошее соответствие мнимой части импеданса с экспериментом

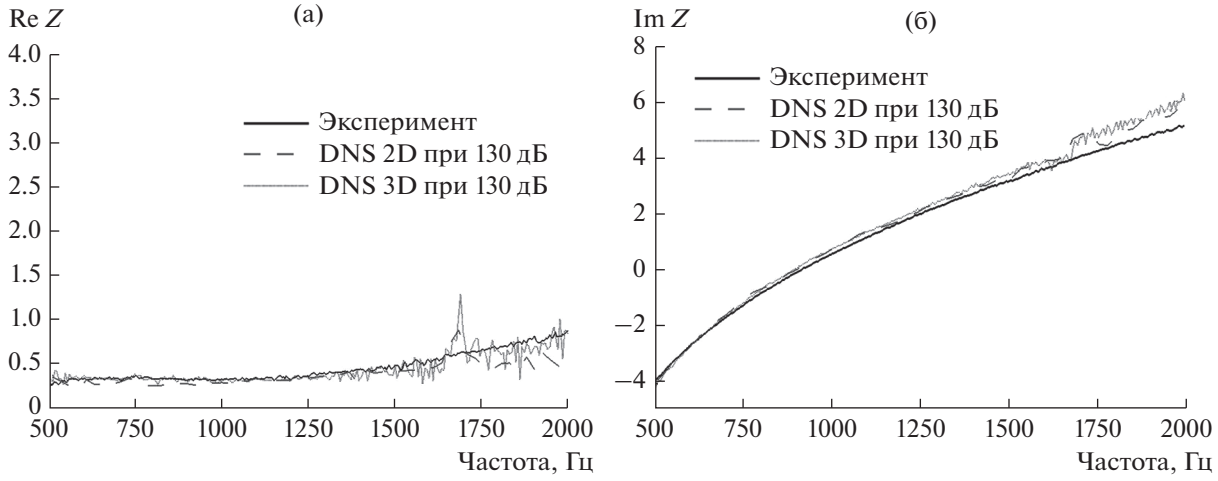

Рис. 7. Импеданс ячейки ЗПК при уровне звукового давления 130 дБ, полученный с использованием полной системы Навье–Стокса: (а) действительная часть, (б) мнимая часть.

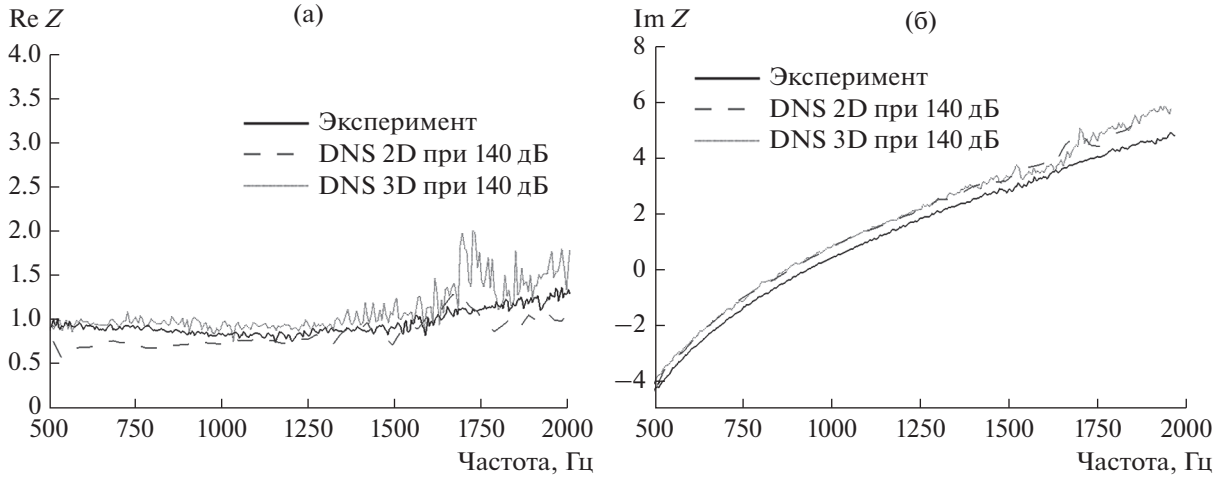

Рис. 8. То же, что на рис. 7, при уровне звукового давления 140 дБ.

(рис. 6б). Действительная часть импеданса хорошо соответствует эксперименту при расчете на уровне 110 дБ, однако при повышении уровня входного сигнала результаты расчета слабо изменяются и отличие с экспериментом становится значительным. При уровнях выше 110 дБ данный образец начинает работать на нелинейном режиме, и использование линеаризованных уравнений Навье–Стокса неполным образом описывает процессы, происходящие в физическом эксперименте. Линеаризация уравнений Навье–Стокса приводит к тому, что вихреобразование в области горла резонатора не может быть адекватно промоделировано. В то же время при высоких значениях уровня звукового давления в интерферометре происходит интенсивное образование вихрей.

На рис. 7–9 представлены (а) действительная и (б) мнимая части импеданса одиночной ячейки при уровнях сигнала 130, 140 и 150 дБ, полученные с использованием полной системы уравнений Навье–Стокса в Ansys Fluent.

Как видно из рис. 6, при уровне возбуждающего сигнала 130 дБ численный расчет удовлетворительно описывает процесс гашения звука в ячейке. С ростом уровня возбуждающего сигнала происходит рост расхождений между расчетом и экспериментом, однако действительная часть импеданса в области собственной частоты работы резонатора определяется достаточно хорошо, особенно при трехмерных расчетах.

Для более детального анализа результатов расчета была вычислена функция когерентности между сигналами с микрофонов. Промежуточные значения функции когерентности свидетельствуют о наличии нелинейных воздействий на сигналы с микрофонов. На рис. 10 показана величина функции когерентности между сигналами звукового давления, измеренными микрофонами

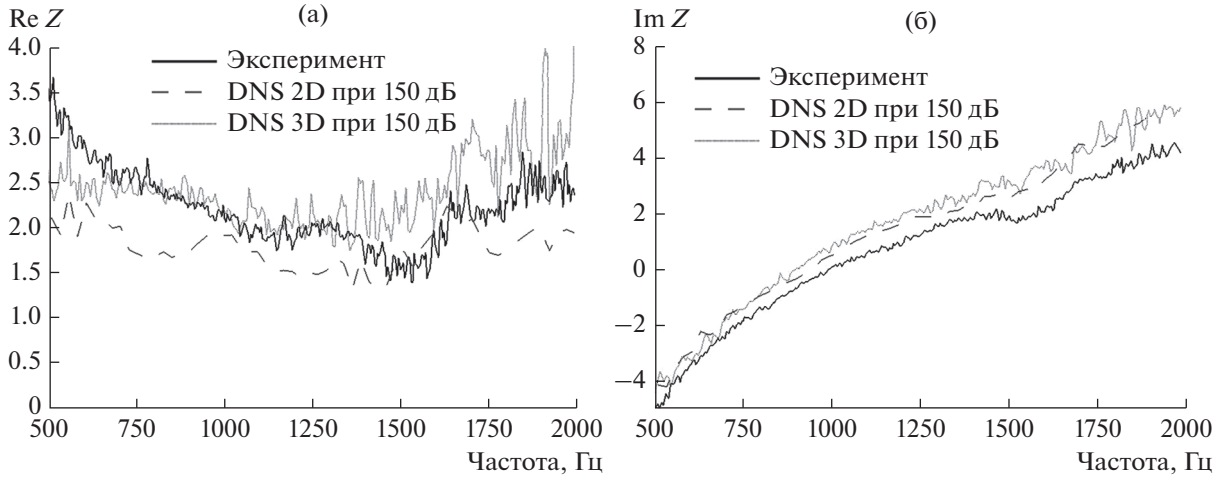

Рис. 9. То же, что на рис. 7, при уровне звукового давления 150 дБ.

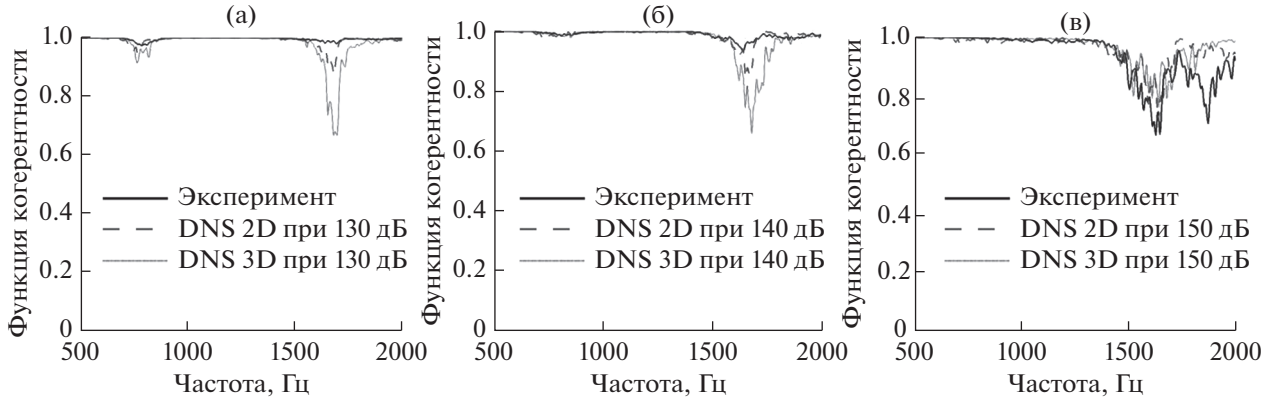

Рис. 10. Функция когерентности между сигналами с микрофонов при уровне звукового давления (а) 130 дБ, (б) 140 дБ, (в) 150 дБ.

Рис. 11. Визуализация вихревых структур внутри интерферометра при уровне звукового давления (а) 130 дБ, (б) 140 дБ, (в) 150 дБ.

1 и 2, для уровней звукового давления в падающей волне 130, 140 и 150 дБ соответственно.

Результаты натурного и численного экспериментов показывают, что значение функции когерентности в частотном диапазоне от 500 до 2000 Гц преимущественно близко к единице. Наблюдаются “провалы” функции когерентности в районе 750 и 1650 Гц, что представляет собой негативное явление при испытании образцов ЗПК. Появление этого эффекта как в физическом, так и в численном эксперименте свидетельствует о правильности постановки численного эксперимента.

Падение функции когерентности двух сигналов с микрофонов интерферометра объясняется расположением узлов стоячей волны на определенных частотах в местах установки микрофонов [14].

С повышением уровня звукового давления растет скорость в горле резонатора. Даже при уровне 130 дБ, средняя скорость в горле составляет 2.52 м/с. При этом среднее число Рейнольдса, определенное по размеру горла резонатора, составляет 8400, что соответствует турбулентному режиму течения. В связи с этим проводился анализ картины течения внутри интерферометра.

На рис. 11 представлена визуализация вихревых структур внутри интерферометра. Как можно увидеть, внутри интерферометра наблюдаются крупные когерентные вихревые структуры, похожие на вихревые кольца и распространяющиеся как внутри резонатора, так и в трубе интерферометра. При этом течение имеет сложный характер. При уровне 130 дБ данные вихри сосредоточены в области, близкой к горлу резонатора в разные моменты времени. С повышением уровня происходит их распространение по всей расчетной области. При увеличении интенсивности вихрей и увеличении области, занимаемой вихрями, увеличивается диссипация энергии, что приводит к росту действительной части импеданса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ процессов в интерферометре с одиночным резонатором Гельмгольца с помощью линеаризованных уравнений Навье–Стокса и прямого численного моделирования показал, что для качественной оценки звукопоглощающих свойств образцов при высоких уровнях акустического давления требуется использовать решение системы уравнений Навье–Стокса с учетом сжимаемости, так как только при данном методе возможно качественно оценить действительную часть импеданса.

Анализ также показывает, что численное моделирование результатов измерения импеданса на интерферометре с более дальним расположением микрофонов относительно образца, чем это было реализовано в настоящей работе, требует применение сетки с существенно большим числом элементов и поэтому сталкивается с более затратными расчетами.

Результаты получены в рамках работ по госзаданию, выполняемому научными коллективами исследовательских центров и (или) научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, регистрационный номер 9.3480.2017/ПЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абалакин И.В., Горобец А.В., Козубская Т.К.* Вычислительные эксперименты по звукопоглощающим конструкциям // Математическое моделирование. 2007. Т. 19. № 8. С. 15–21.
2. *Комкин А.И., Миронов М.А., Юдин С.И.* Собственная частота резонатора Гельмгольца на стенке прямоугольного канала // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 2. С. 145–151.
3. *Комкин А.И., Быков А.И.* Инерционная присоединенная длина горла резонаторов Гельмгольца // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 3. С. 277–287.
4. *Schiller N.H., Jones M.G., Bertolucci B.* Experimental evaluation of acoustic engine liner models developed with COMSOL Multiphysics // AIAA Paper 2017–4186.
5. *Eldredge J.D., Shoeybi M., Bodony D.J.* Numerical investigation of the acoustic behavior of a multi-perforated liner // AIAA Paper 2007-3683.
6. *Zhang Q., Bodony D.J.* Impedance predictions of 3D honeycomb liner with circular apertures by DNS // AIAA Paper 2011-2727.
7. *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, 2014, AIAA Paper 2014-2960.
8. *Roche J.M., Leylekian L., Delattre G., Vuillot F.* Aircraft fan noise absorption: DNS of the acoustic dissipation of resonant liners // 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2009, AIAA Paper 2009-3146.
9. *Tam C.K.W., Ju H., Jones M.G., Watson W.R., Parrott T.L.* A computational and experimental study of slit resonators // J. Sound Vibr. 2005. V. 284. P. 947–984.
10. *Fedotov E.S., Khramtsov I.V., Kustov O.Y.* Numerical simulation of the processes in the normal incidence tube for high acoustic pressure levels // AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1770. http://dx.doi.org/. doi 10.1063/1.4964062
11. *Кустов О.Ю., Пальчиковский В.В., Берсенев Ю.В., Соболев А.Ф.* Разработка интерферометра с нормальным падением волн для высоких уровней акустического давления // Тезисы докладов четвертой открытой всероссийской конференции по аэроакустике, г. Звенигород, 29.09.2015–01.10.2015. С. 79–80.
12. *Федотов Е.С., Кустов О.Ю., Храмцов И.В., Пальчиковский В.В.* Сравнительный анализ акустических интерферометров на основе расчетно-экспериментальных исследований образцов звукопоглощающих конструкций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. № 48. С. 89–103.
13. *Chung J.Y., Blaser D.A.* Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory // J. Acoust. Soc. Am. 1980. l. 68. № 3.
14. ISO 10534-2, Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method.
15. *Ипатов М.С., Остроумов М.Н., Соболев А.Ф.* Влияние спектра высокоинтенсивного источника звука на звукопоглощающие свойства облицовок резонансного типа // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 4. С. 465–472.