Численное моделирование колебательных процессов в модельном канале с двумя перегородками, заполненном водородом / М.А. Серегина, В.Я. Модорский, И.Е. Черепанов, А.В. Бабушкина. – DOI: 10.15593/perm.mech/2024.6.05 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 6. – С. 47–59.

Perm Polytech Style: Seregina M.A., Cherepanov I.E., Modorskii V.Ya., Babushkina A.V. Numerical simulation of oscillatory processes in a model channel with two partitions filled with hydrogen. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2024, no. 6, pp. 47-59. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.6.05

пермский политех

**ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА**
**№ 6, 2024**
**PNRPU MECHANICS BULLETIN**
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2024.6.05
УДК 534.2

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В МОДЕЛЬНОМ КАНАЛЕ С ДВУМЯ ПЕРЕГОРОДКАМИ, ЗАПОЛНЕННОМ ВОДОРОДОМ

**М.А. Серегина, В.Я. Модорский, И.Е. Черепанов, А.В. Бабушкина**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 29 сентября 2024 г.
Одобрена: 21 ноября 2024 г.
Принята к публикации:
16 декабря 2024 г.

*Ключевые слова:*

акустика, транспортировка водорода, 2FSI, газоход, распространение волны, численное моделирование, взаимодействие газа с преградой, звукопоглощение, резонанс.

АННОТАЦИЯ

Рассматривается распространение звуковой волны в канале прямоугольного сечения с двумя перегородками из стеклопластика. Получены временные зависимости давления и перемещений для точек, расположенных в разных частях модельного канала. В качестве рабочего тела среды рассматриваются водород и воздух.

Разработан алгоритм решения краевой задачи численного моделирования колебательных процессов в модельном канале прямоугольного сечения, с учетом двунаправленного взаимодействия (2-way Fluid-Structure Interaction или при сокращении 2FSI) между деформируемыми перегородками и потоком рабочей среды, с применением системы инженерного анализа ANSYS. Разработана математическая модель, соответствующая краевой задаче. Заданы начальные и граничные условия и выбраны контрольные точки по длине модельного канала и на стеклопластиковых перегородках.

Представлены основные результаты исследования в виде зависимостей амплитуды перемещения перегородки и давления в рабочей среде (воздух или водород) от времени в характерных точках канала. Обнаружено, что переходные процессы на воздухе и водороде отличаются амплитудой и частотой колебания; обнаружена зависимость влияния числа перегородок на колебания в газовой среде. Рассмотренная система может стать моделью для проработки условий возникновения автоколебаний для разных рабочих сред.

Прогнозирование поведения конструкции трубопровода, в модельном представлении, при воздействиях разных газов в процессе транспортировки позволит оценить влияние транспортируемой среды на акустические характеристики системы. Исследование данного вопроса крайне важно для поиска областей снижения шума при транспортировке любых газовых смесей по трубопроводам.

© **Серегина Маргарита Андреевна** – асп. кафедры ракетно-космической техники и энергетических систем, инж. центра высокопроизводительных вычислительных систем, e-mail: maseregina@pstu.ru.
**Модорский Владимир Яковлевич** – д. т. н., доц., декан аэрокосмического факультета, e-mail: modorsky@pstu.ru.
**Черепанов Иван Евгеньевич** – инж. центра высокопроизводительных вычислительных систем, e-mail: cherepanovie@sbiw.ru.
**Бабушкина Анна Викторовна** – к. т. н., доц. кафедры механики композиционных материалов и конструкций, e-mail: annvikoz@mail.ru.

**Margarita A. Seregina** – Postgraduate student of the Department of Rocket and Space Engineering and Energy Systems, Engineer of the Center for High-Performance Computing Systems, e-mail: maseregina@pstu.ru.
**Vladimir Ya. Modorskii** – Doctor of Technical Sciences, Ass. Professor, Dean of Aerospace Faculty, e-mail: modorsky@pstu.ru.
**Ivan E. Cherepanov** – Engineer of the Center for High-Performance Computing Systems, e-mail: cherepanovie@sbiw.ru.
**Anna V. Babushkina** – PhD in Technical Sciences, Ass. Professor, Department of mechanics of composite materials and structures, e-mail: annvikoz@mail.ru.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

# NUMERICAL SIMULATION OF OSCILLATORY PROCESSES IN A MODEL CHANNEL WITH TWO PARTITIONS FILLED WITH HYDROGEN

**M.A. Seregina, V.Ya. Modorskii, I.E. Cherepanov, A.V. Babushkina**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 29 September 2024
Approved: 21 November 2024
Accepted for publication:
16 December 2024

*Keywords:*

acoustic, hydrogen, transportation of hydrogen, 2FSI, gas channel, wave propagation, numerical simulation, interaction of gas with an obstacle, sound absorption, resonance.

ABSTRACT

This article discusses the propagation of a sound wave in a channel with a rectangular cross-section with two fiberglass partitions. The time dependences of pressure and displacements for points located in different parts of the model channel are obtained. Hydrogen and air are considered as the working media. An algorithm has been developed for solving the boundary value problem of the numerical simulation of oscillatory processes in the model's channel with a rectangular cross-section, taking into account the bidirectional interaction (2-way Fluid-Structure Interaction or 2FSI reduction) between deformable partitions and the flow of the working environment, using the ANSYS engineering analysis system. A mathematical model corresponding to the boundary value problem has been developed. Initial and boundary conditions are set and control points along the length of the model channel and on fiberglass partitions are selected. The main results of the study are presented in the form of dependences of the amplitude of displacement of the partition and pressure in the working media (air or hydrogen) on time at characteristic points of the channel. It was found that transients in air and hydrogen differ in amplitude and frequency of oscillation; the dependence of the influence of the number of partitions on fluctuations in the gaseous medium was found. The considered system can become a model for working out the conditions for the occurrence of self-oscillations for different working environments. Predicting the behavior of the pipeline structure, in a model representation, under the influence of different gases during transportation will allow us to assess the influence of the transported medium on the acoustic characteristics of the system. The study is highly important for finding areas of noise reduction during the transportation of any gas mixtures through pipelines.

## Введение

Акустические волны могут эффективно распространяться как в газовой среде, так и через материалы конструкции, такие как сталь, пластик и т.д. [1]. Физико-механические характеристики этих материалов определяют скорость распространения акустических волн, их амплитуду и частотные характеристики.

Выбор материала конструкции трубопровода влияет на уровень шума, создаваемого в процессе транспортировки газа. При соударении акустических волн с материалом происходит гашение звука, которое зависит от физико-механических характеристик материала и количества препятствий на пути движения звуковой волны.

В рамках энергетической стратегии ЭС-2035 Российской Федерации особое внимание уделяется транспортировке и хранению водорода и водородосодержащих газовых смесей. Этот сегмент является одним из важнейших в плане обеспечения устойчивого развития отрасли и диверсификации источников энергии [1–10].

Транспортировка и хранение водорода играют существенную роль в будущем энергетического развития России. Развитие этого направления позволит не только диверсифицировать источники энергии, но и сделать значительный вклад в обеспечение экологической устойчивости страны. Ключевыми задачами остаются совершенствование технологий транспортировки, построение необходимой инфраструктуры и создание благоприятного климата для развития водородной энергетики.

Шум, возникающий при движении газа через трубопроводы, не только негативно влияет на окружающую среду, но также может оказывать вредное воздействие на здоровье человека и животных. Уровень шума зависит от множества факторов, включая диаметр трубопровода, скорость потока газа, давление и температуру, а также материалы, используемые в конструкции [11; 12].

В связи с этим в работе затрагиваются вопросы, связанные с шумом, возникающим при транспортировке водорода. Так, рассматриваются процессы, связанные с возникновением и распространением акустической волны в трубопроводе в условиях транспортировки водорода.

Моделирование акустических процессов зачастую связано с источниками их возникновения и распространения в моделируемой рабочей среде. Ряд авторов определяет акустические характеристики на установке «канал с потоком» [13–29]. При этом не учитывается возникновение возможных резонансных явлений и/или процессов ослабления акустических волн в динамической системе «газ – конструкция». Для возможности учета данных процессов необходимо рассматривать краевую задачу в полной постановке как 2*FSI*-связанную задачу взаимовлияния деформируемой конструкции и газодинамического потока (англ. 2-*way Fluid-Structure Interaction*), т.е. в аэроупругой постановке, как, например, было сделано в работах [30–32].

## Постановка задачи моделирования колебательных процессов в модельном канале с двумя перегородками

В работе исследуются колебательные процессы в модельном канале прямоугольного сечения, с двумя перегородками, заполненном газом.

Расположение областей задания начальных и граничных условий, контрольных расчетных точек представлено на рис. 1. Сечение канала имеет размеры 50 × 100 мм. Две перегородки, толщиной 1 мм, делят длину канала на три части (полости).

Для оценки влияния материала перегородки на процессы распространения и гашения акустической волны в канале выбраны следующие контрольные точки:

– т.т. 1-2 располагаются до перегородки (со стороны возникающих возмущений потока), т. 1 вблизи генератора колебаний справа, т. 2 посредине левой полости;

– т. 3 располагается в непосредственной близости от перегородки слева;

– т. 4 располагается в непосредственной близости от перегородки справа;

– т. 5 и т. 6 располагаются в непосредственной близости от второй перегородки, соответственно,

– т. 7 располагается посередине третьей полости,

– т. 8 располагается вблизи заглушки,

– т. 9 располагается между двумя перегородками,

– т. 10 и т. 11 располагаются внутри перегородок.

Математическая модель связанной 2*FSI*-постановки для обозначенной рабочей области базируется на методе расщепления по физическим областям: газодинамической и механической.

Для газодинамической области сформулирована следующая концептуальная постановка:

1. Исследуемые процессы рассматриваются в трехмерной нестационарной постановке.

2. Объектами исследования является рабочее тело: воздух или чистый водород.

3. В начальный момент времени рабочее тело не имеет возмущений физических параметров.

4. Для исследуемых рабочих тел не рассматриваются возможные химические процессы.

5. Рабочее тело рассматривается в приближении однофазности потока.

6. Канал заполнен рабочим телом до, между и после перегородок.

7. Стенки канала рассматриваются как недеформируемые, процессы теплопередачи не учитываются.

8. Не учитывается влияние гравитации.

9. Шероховатость стенок модельного канала не учитывается.

10. Источником возмущения является внешнее воздействие, описываемое одномодовым синусоидальным сигналом.

11. Рабочее тело влияет на перегородки за счет перераспределения газодинамических полей потока и в то же время испытывает отклик на процесс деформирования перегородок; при этом генерируемая на входе волна распространяется по длине модельного канала, достигает перегородок, взаимодействует с ними, отражается, частично гасится и проникает через перегородки с последующей трансляцией возмущений в поток.

Для механической области (перегородка в канале прямоугольного сечения) сформулирована следующая концептуальная постановка:

1. Процессы в перегородке описываются в рамках теории упругости и рассматриваются в трехмерной нестационарной постановке.

2. В начальный момент времени перегородка не деформирована.

3. Перегородка размещается внутри канала и имеет защемление (жесткая заделка) по периметру.

4. Под влиянием возмущений от газодинамического потока перегородка деформируется, при этом энергия волны затрачивается на деформирование с последующим возникновением и распространением газодинамического возмущения в потоке по обе стороны перегородки.

5. На поверхностях перегородки, взаимодействующих с газодинамическими областями, выполняются условия совместности.

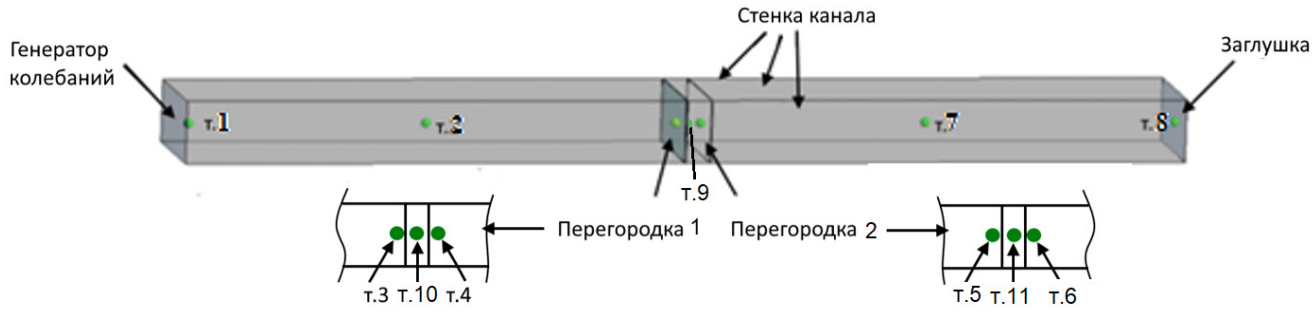



Рис. 1. Схема модельного канала с расположением областей и точек для задания граничных условий

Fig. 1. Scheme of the channel with the location of areas and points for setting boundary conditions

Таким образом, разработанная математическая модель связанной 2*FSI*-постановки для исследуемых акустических процессов в канале прямоугольного сечения с перегородками базируется, для газодинамической области, на уравнениях Рейнольдса, замкнутых моделью турбулентности *k*–ω (англ. *Shear-Stress Transform*) и позволяет описывать распространение акустической волны по потоку. Для механической области математическая модель описывается дифференциальными уравнениями в перемещениях в приближении линейной изотропной теории упругости. Полная система уравнений математической модели исследуемых процессов представлена в работе коллектива авторов [33]. В работе [33] приведены результаты подобных исследований, полученных для воздуха. Данные результаты используются для последующего сравнительного анализа.

В соответствии с принятой математической моделью выбраны методы решения. Для решения задачи деформирования пластины использован метод конечных элементов, для решения задачи газовой динамики – метод конечных объемов. В соответствии с принятыми методами решения принят алгоритм расчета, представленный на рис. 2.

На первом этапе выполняется инициализация расчетных областей. Для газодинамической области задаются начальные распределения параметров газа (давления и температуры), определяемые аналитическими зависимостями или результатами стационарного расчета. Для конструкции задаются нулевые начальные перемещения и скорости движения перегородки.

На втором этапе выполняется итерационный расчет для газа и конструкции для *i*-го шага по времени. Из газодинамического расчета полученное распределение давления на поверхности сопряжения передается в модуль расчета НДС. Деформирование сеточной модели в модуле расчета напряженно-деформированного состояния не происходит в связи с малыми перемещениями. Полученные перемещения в расчете НДС передаются в модуль расчета газовой динамики, в котором происходит деформирование сеточной модели и непосредственно расчет движения газа. Итерационный процесс повторяется пока средняя квадратическая величина невязок передаваемых перемещений и давления выше заданного значения. После достижения условия сходимости выполняется переход к следующему шагу по времени. Расчет останавливается после достижения заданного времени $t_n$.

Для численной реализации в работе использовался программный комплекс инженерного анализа *ANSYS*, позволяющий моделировать исследуемые процессы в рамках разработанной 2*FSI*-математической модели.

В качестве начальных условий для газодинамических областей задана величина давления, соответствующая 0,1 МПа.

Граничные условия расчетной области (см. рис. 1) определены на соответствующих областях следующим образом:

– поверхность «Генератор колебаний» соответствует подвижной стенке, движущейся по синусоидальному закону. В терминах перемещений это соответствует зависимости $U = 10 \sin(2\pi\, 50t)$, частоте колебаний 50 Гц;

– на поверхности «Перегородка» определены условия типа деформируемая стенка, с возможностью восприятия воздействий от набегающей акустической волны;

– на поверхностях «Заглушка» и «Стенка канала» определены условия по типу неподвижной стенки, без прилипания потока, отсутствует шероховатость.

Для расчетной схемы разработаны сеточные модели соответствующих областей в рамках топологии *O-grid*.

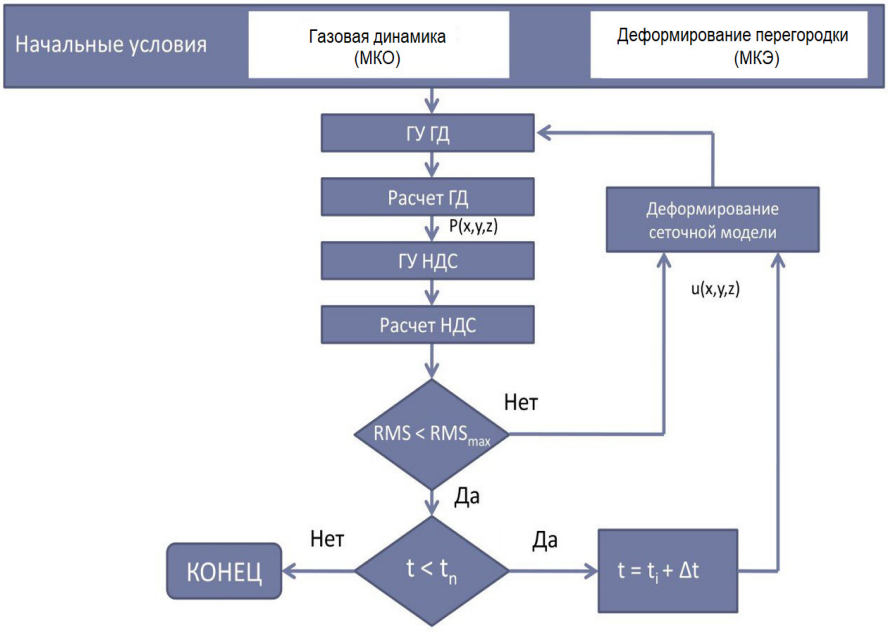



Рис. 2. Алгоритм расчета

Fig. 2. Calculation algorithm




Рис. 3. Зависимость $U_{10}$ (т.10) и $U_{11}$ (т.11) от времени (до 50 мс), $U_{10}$=100$U_{11}$; рабочая среда – воздух

Fig. 3. Dependence of $U_{10}$ (p.10) and $U_{11}$ (p.11) on time (up to 50 ms), $U_{10}$=100$U_{11}$; the working medium is air




Рис. 4. Зависимость $U_{10}$ (т.10) и $U_{11}$ (т.11) от времени (до 50 мс), $U_{10}$=100$U_{11}$; рабочая среда – водород

Fig. 4. Dependence of $U_{10}$ (p.10) and $U_{11}$ (p.11) on time (up to 50 ms), $U_{10}$=100$U_{11}$; the working medium is hydrogen

На рис. 3 приводится одновременное изменение перемещений перегородок во времени в рабочей среде воздух: для перегородки 1 ($U_{10}$, левая ось ординат) и перегородки 2 ($U_{11}$, правая ось ординат). Перемещение перегородки 1 и перегородки 2 происходит синхронно, форма колебаний совпадает, амплитуда колебаний перегородки 2 на два порядка ниже, чем перегородки 1. Для промежутка времени с 0 мс до 10 мс происходит переходный процесс деформирования двух перегородок до установления «стабильной» амплитуды, дальнейшее уменьшение или увеличение амплитуды колебаний для исследуемого промежутка времени не происходит.

Как было отмечено в предыдущем исследовании, введение второй перегородки меняет характер колебания как по перемещениям перегородки 1, так и по изменению давления вблизи нее, по сравнению с конструкцией, имеющей только одну перегородку в прямоугольном канале, – наблюдаются колебания на несущей частоте, но происходит и модуляция на собственной частоте газодинамической полости [33].

На рис. 4 приводится одновременное изменение перемещений перегородок во времени в рабочей среде водород: для перегородки 1 – левая ось ординат и для перегородки 2 – правая ось ординат. Перемещение перегородки 1 и перегородки 2 происходит синхронно, форма колебаний совпадает, амплитуда колебаний перегородки 2 на два порядка ниже, чем перегородки 1. Для промежутка времени с 0 мс до 10 мс происходит переходный процесс деформации двух перегородок – частота перемещений для перегородки 2 значительно

выше, чем у перегородки 1. После 20 мс амплитуда становится «стабильной», дальнейшее уменьшение или увеличение амплитуды колебаний для исследуемого промежутка времени не происходит.

Сравнение рис. 3 и рис. 4 показывает, что на водороде наблюдается переходный процесс, имеющий в 6 раз более высокую частоту колебаний и в 1,5 раза меньшую амплитуду, чем на воздухе. В остальном процессы подобны. Таким образом, высокочастотные колебания при низкочастотном воздействии реализуются на водороде при наличии второй перегородки. Перемещения перегородки 1 в разных рабочих средах подобны. В первый полупериод, из-за разной скорости звука в водороде и воздухе, колебания отличаются. Заметно, что весь первый период наблюдается расхождение характера перемещений для второй перегородки, как в воздухе, так и в водороде. Различная скорость звука рабочих сред влияет на скорость распространения звуковой волны. Второй перегородке, расположенной в рабочей среде водород, требуется больше времени для установления «стабильной» амплитуды. Амплитуда второй перегородки, расположенной в воздухе, имеет большую амплитуду перемещения, чем подобная перегородка, помещенная в водороде.

На рис. 5 приводится одновременное изменение перемещений во времени для перегородки 1 в точке 10 (левая ось ординат) и изменение давления во времени в точке 3 (слева от точки 10) в газодинамической полости, заполненной воздухом (правая ось ординат).

При пересечении оси абсцисс на рис. 5 наблюдается некоторый сдвиг фаз двух графиков. Для детального анализа сдвига фаз рассмотрим увеличенное пространство от 10,10 до 10,35 мс (рис. 6).

На рис. 6 представлены зависимости перемещений во времени для перегородки 1 в т. 10 (левая ось ординат) и изменения давления во времени в точке 3, расположенной слева вблизи точки 10 в газодинамической полости (правая ось ординат). Для оценки сдвига фаз рассмотрим участок графика, приближенный к точке пересечения оси абсцисс (от 10,2 до 10,25 мс). Для первого полупериода (I) сдвиг фаз составил $\frac{\pi}{24}$ – отставание колебаний возмущающего давления от колебаний перегородки позволяет предположить наличие потерь на границе и дает возможность моделирования перегородок в упругой постановке.

Во втором полупериоде (II) также присутствует отставание колебаний возмущающего давления от колебаний перегородки (рис. 7), для второго полупериода сдвиг фазы составил $\frac{\pi}{73}$, разность фаз между двумя точками не постоянна, а меняется со временем.

В третьем полупериоде (III) перемещение перегородки и колебание возмущающего давления не имеют сдвига по фазе (рис. 8), амплитуда колебаний держится в диапазоне 2,54…2,96 кПа (см. рис. 5).

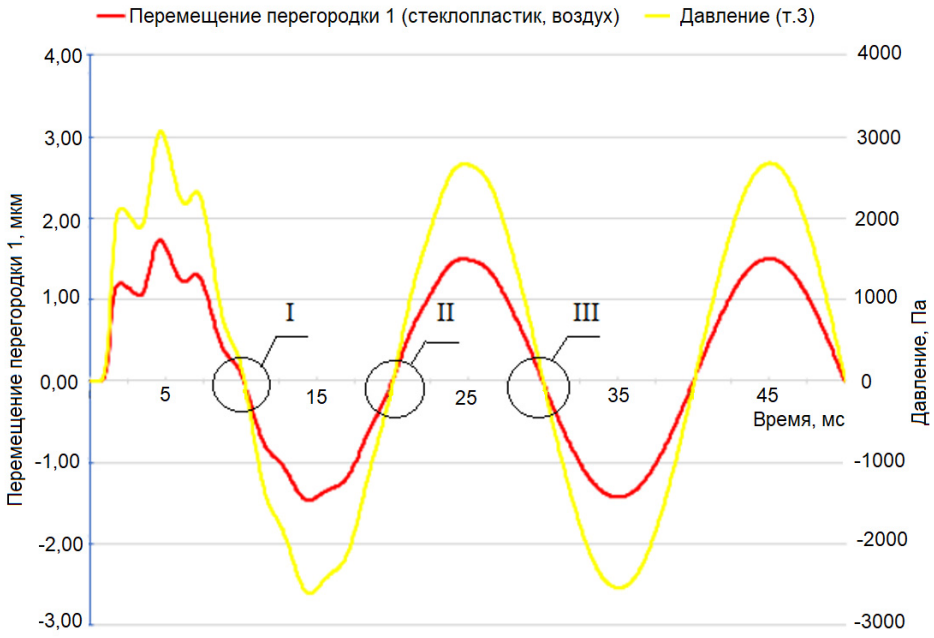



Рис. 5. Зависимость перемещения перегородки 1 $U_{10}$ (т. 10) и давления $P_3$ (т. 3) от времени (до 50 мс); рабочая среда – воздух

Fig. 5. Dependence of the movement of partition 1 $U_{10}$ (p. 10) and pressure $P_3$ (p. 3) on time (up to 50 ms); the working medium is air

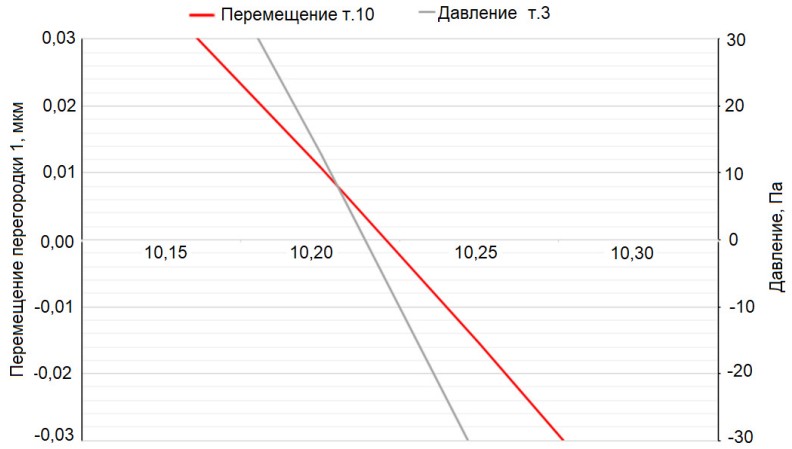



Рис. 6. Фаза I на временном промежутке от 10,10 до 10,35 мс; рабочая среда – воздух

Fig. 6. Phase I in the time interval from 10.10 ms to 10.35 ms; the working medium is air

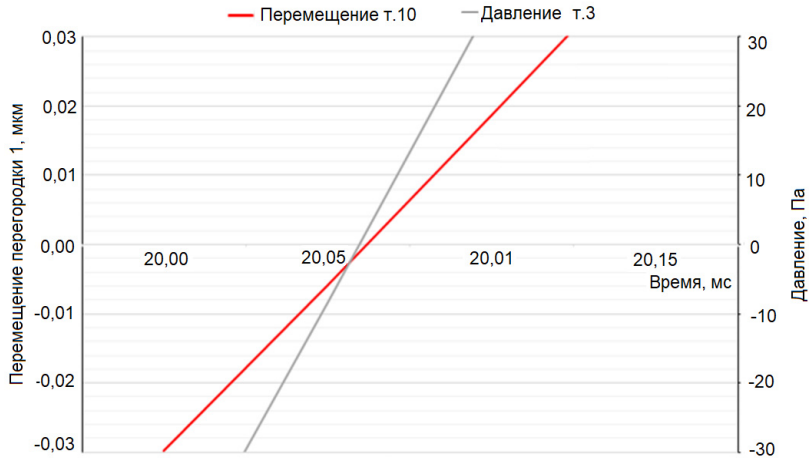



Рис. 7. Фаза II на временном промежутке от 19,95 до 20,20 мс; рабочая среда – воздух

Fig. 7. Phase II in the time interval from 19.95 ms to 20.20 ms; the working medium is air

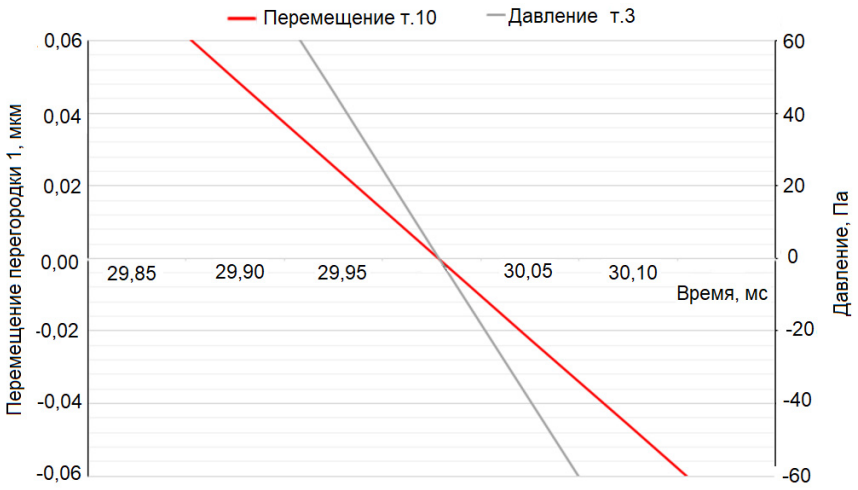



Рис. 8. Фаза III на временном промежутке от 29,8 до 30,20 мс; рабочая среда – воздух

Fig. 8 Phase III in the time interval from 29.8 ms to 30.20 ms; the working medium is air

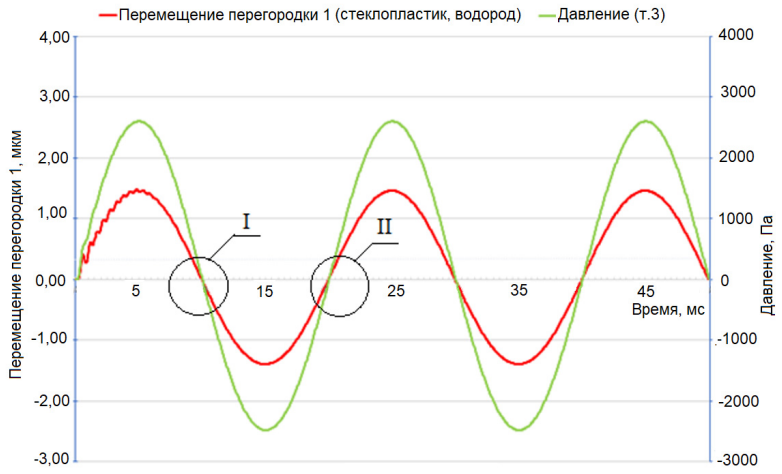



Рис. 9. Зависимость перемещения перегородки 1 $U_{10}$ (т.10) и давления $P_3$ (т. 3) от времени (до 50 мс); рабочая среда – водород

Fig. 9. Dependence of the movement of the partition 1 $U_{10}$ (p.10) and pressure $P_3$ (p. 3) on time (up to 50 ms); the working medium is hydrogen

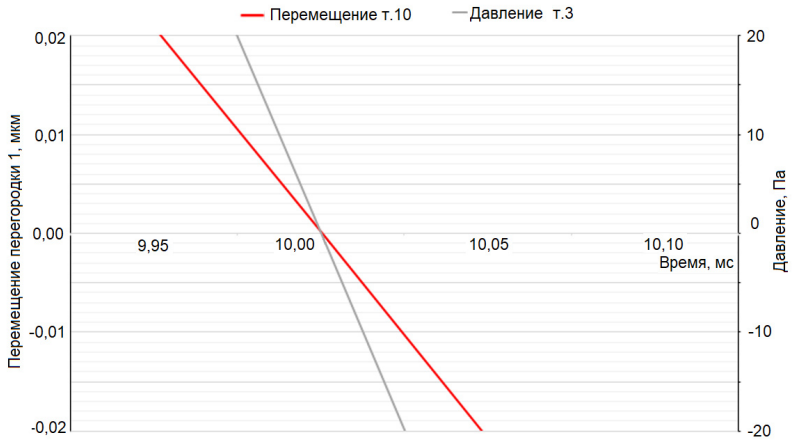



Рис. 10. Фаза I на временном промежутке от 9 мс до 10,15 мс; рабочая среда – водород

Fig. 10. Phase I in the time interval from 9 ms to 10.15 ms; the working medium is hydrogen

На рис. 9 приводится одновременное изменение перемещений во времени для перегородки из стеклопластика в точке 10 (левая ось ординат) и изменения давления во времени в точке 3 (слева от точки 10) в газодинамической полости, заполненной водородом (правая ось ординат).

При пересечении оси абсцисс на рис. 9 сдвиг фаз двух графиков не наблюдается. Рассмотрим рис. 10, на котором представлены зависимости изменения во времени перемещения для перегородки из стеклопластика в точке 10 (левая ось) и давления в точке 3, расположенной слева вблизи точки 10 в газодинамической полости (правая ось ординат). Для первого полупериода сдвиг фаз не обнаружен.

На рис. 11 (фаза II) представлены зависимости перемещений во времени для перегородки 1 в точке 10 (левая ось ординат) и изменения давления в точке 3, расположенной слева вблизи точки 10 в газодинамической полости, заполненной водородом (правая ось ординат). Для второго полупериода сдвиг фаз не обнаружен. По результатам сравнения рис. 5–8 с рис. 9–11 можно сделать вывод, что на водороде отсутствуют заметный сдвиг фаз колебаний давления $P$ и перемещения $U$, а на воздухе он имеется. Кроме того, амплитуда $P$ на воздухе на 17 % выше, чем на водороде. Значения $U$ на воздухе на 10 % выше, чем на водороде. Частоты колебательных процессов на водороде и воздухе близки на установившемся режиме, но значительно отличается на переходных режимах.

На рис. 12 приводятся одновременные изменения перемещений во времени для второй перегородки из стеклопластика в точке 11 (левая ось ординат) и изме-

нения давления во времени в точке 5 (слева от точки 11), в точке 6 (справа от точки 11), в точке 7, расположенной в середине части канала за второй перегородкой (правая ось ординат). Для облегчения анализа графиков давление в точках 6 и 7 увеличено в 100 раз.

Давление в точках 6 и 7 (см. рис. 12), расположенных в правой части канала, после второй перегородки, снизилось на два порядка относительно давления в точке 5, расположенной в левой части от второй перегородки, так же изменился характер колебаний. Общий тренд изменения давления в точках 6 и 7 от времени – снижение.

На рис. 13 приводятся одновременное изменение перемещений во времени для второй перегородки из стеклопластика в т.11 (левая ось ординат) и изменения давления во времени в точке 5 (слева от точки 11), в точке 6 (справа от точки 11), в точке 7 в газодинамической полости (правая ось ординат), в водороде. Для облегчения анализа графиков давление в точках 6 и 7 увеличено в 100 раз.

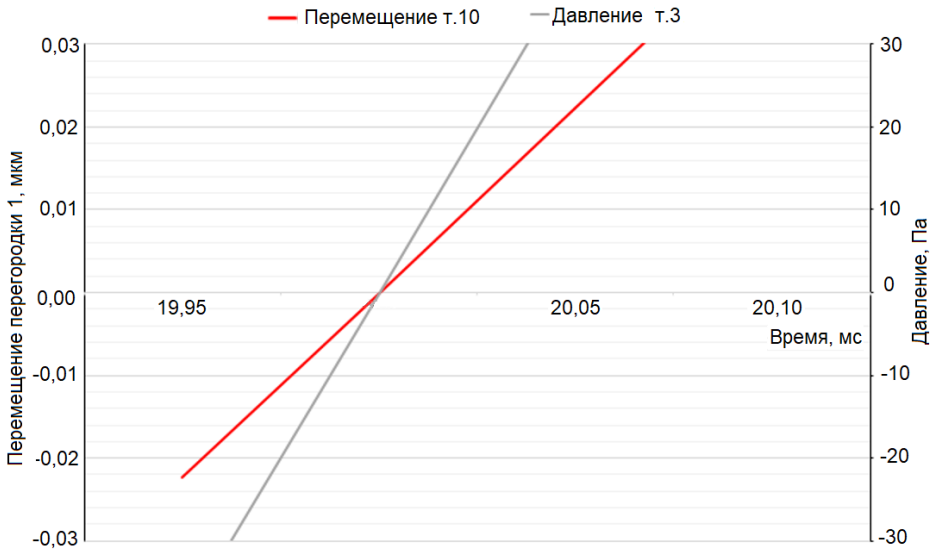



Рис. 11. Фаза II на временном промежутке от 19,9 мс до 20,15 мс; рабочая среда – водород

Fig. 11. Phase II in the time interval from 19.9 ms to 20.15 ms; the working medium is hydrogen

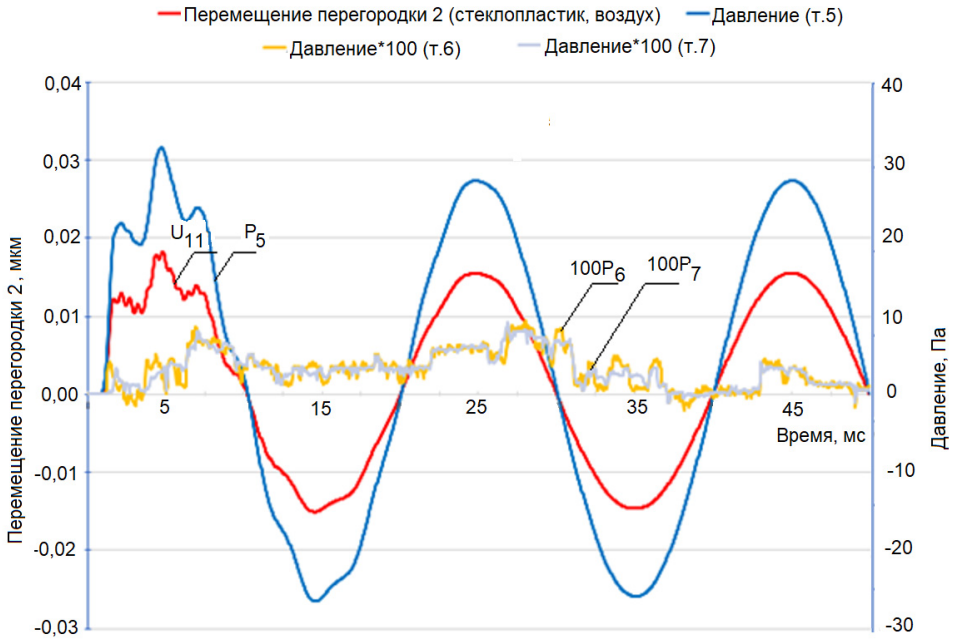



Рис. 12. Зависимости перемещений перегородки 2 $U_{11}$ (т. 11) и давления $P_5$, $P_6$, $P_7$ от времени (до 50 мс); рабочая среда – воздух

Fig. 12. Dependences of the movements of the partition 2 $U_{11}$ (p. 11) and the pressure $P_5$, $P_6$, $P_7$ on time (up to 50 ms); the working medium is air

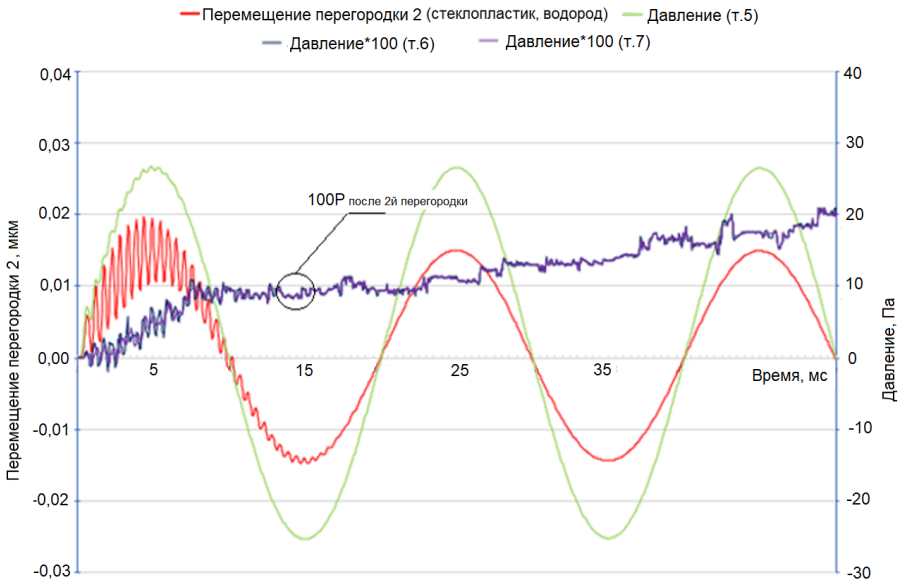



Рис. 13. Зависимости перемещений перегородки 2 $U_{11}$ (т.11) и давления $P_5$, $P_6$, $P_7$ от времени (до 50 мс); рабочая среда – водород

Fig. 13. Dependences of the movements of the partition 2 $U_{11}$ (p.11) and the pressure $P_5$, $P_6$, $P_7$ on time (up to 50 ms); the working medium is hydrogen

Проанализируем, как меняется давление в контрольных точках в водороде и на воздухе (рис. 12, 13). Давление в точках 6 и 7 (рис. 13), расположенных в правой части канала, после второй перегородки, снизилось на два порядка относительно давления в точке 5, расположенной в левой части от второй перегородки, так же изменился характер колебаний. Общая тенденция изменения давления в точках 6 и 7 – увеличение давления в зависимости от времени.

Учет влияния физико-механических характеристик материала перегородок на распространение акустических волн в модельном канале является необходимым условием описания процесса даже в отсутствие резонанса и требует внимания специалистов в области газотранспортных систем. Это позволит разработать более эффективные методы снижения уровня шума при транспортировке газа и создании комфортных условий для окружающей среды и для людей.

## Заключение

Обнаружен сдвиг по фазе колебаний перемещений перегородки и давления воздуха. Максимальный обнаруженный сдвиг по фазе составил $\pi/24$ с опережением давления.

Сдвиг фаз характеризует наличие потерь в системе. Наличие запаздывания (потерь) может приводить к возникновеняию автоколебаний в конструкции.

Рассмотренная система может стать моделью для проработки условий возникновения автоколебаний для разных рабочих сред.

Колебания в механической системе зависят от вида рабочего тела. Переходные процессы на воздухе и водороде отличаются продолжительностью, амплитудой и частотой колебаний.

Обнаружено, что скорость затухания высокочастотных колебаний зависит от вида рабочего тела.

Обнаружено качественное совпадение частот и форм колебаний в газе и конструкции вблизи перегородки.

Обнаружено, что каждая перегородка из стеклопластика ослабляет колебания в газе на два порядка.

Разработан алгоритм решения краевой задачи численного моделирования колебательных процессов в модельном канале, с учетом двунаправленного взаимодействия между деформируемыми перегородками и потоком рабочей среды.

## Библиографический список

1. Якубсон, К.И. Перспективы производства и использования водорода как одно из направлений развития низкоуглеродной экономики в Российской Федерации (обзор) / К.И. Якубсон // Журнал прикладной химии. – 2020. – Т. 93, № 12. – С. 1675–1695.

2. Analysis of technologies for hydrogen consumption, transition and storage at operating thermal power plants / D. Kolbantseva [et al.] // Energies. – 2022. – Vol. 15, no. 10. – 3671 p.

3. Simulation of the operation of a gas turbine installation of a thermal power plant with a hydrogen fuel production system / G.E. Marin [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Vol. 48, no. 12. – P. 4543–4550.

4. Bayramov, A.N. Comprehensive assessment of system efficiency and competitiveness of nuclear power plants in combination with hydrogen complex / A.N. Bayramov // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Vol. 48, iss. 70. – P. 27068–27078.

5. Развитие «зеленой» водородной энергетики в европейской части Российской Федерации / Э.Р. Зверева [и др.] // Экономика промышленности / Russian Journal of Industrial Economics. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 167–176.

6. Анализ оптимальных способов транспортировки водорода / Е.Э. Иванова [и др.] // Наука и технологии: Перспективы развития и применения. – 2023. – С. 28–45.

7. Голуб, В.В. Экспериментальное исследование диффузионного самовоспламенения водорода в канале / В.В. Голуб, К.В. Иванов // Химическая физика. – 2009. – Т. 28, № 5. – С. 19–26.

8. Володин, В.В. Влияние акустических колебаний на скорость ячеистого водородно-воздушного пламени в горизонтальном канале / В.В. Володин, В.В. Голуб, А.Е. Ельянов // Письма в ЖТФ. – 2022. – Т. 48, № 9. – С. 41.

9. Карасевич, В. Перспективы использования природного газа для производства и экспорта российского водорода / В. Карасевич, Б. Валерий, Р. Мингалеева // Энергетическая политика. – 2023. – № 6 (184). – С. 90–99.

10. Карасевич, В.А. Текущее состояние и потенциал использования природного газа для производства и экспорта водородосодержащей продукции / В.А. Карасевич, С.Ю. Руденко, А.В. Кортиков // Вопросы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2022. – С. 160–165.

11. Исмагилова, В.С. Транспортировка трубопроводного и сжиженного природного газа: сравнительный анализ достоинств и недостатков / В.С. Исмагилова, Т.В. Чекушина // Науки о Земле и недропользование. – 2023. – Т. 46, № 1 (82). – С. 61–71.

12. Darsaliya, N.M. Transportation of hydrogen by main gas pipelines as a methane-hydrogen mixture / N.M. Darsaliya, R.R. Farukhshina, Z.E. Saddik // Liquid and Gaseous Energy Resources. – 2023. – Vol. 3, iss. 1. – 6 p.

13. Расчетно-экспериментальные исследования резонансных многослойных звукопоглощающих конструкций / А.Н. Аношкин [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 1. – С. 5–20.

14. Bielak, G.W. Advanced turbofan duct liner concepts / G.W. Bielak, J.W. Premo, A.S. Hersh. – 1999. – № NASA/CR-1999-209002.

15. Акустические резонансные характеристики двух и трехслойных сотовых звукопоглощающих панелей / А.Г. Захаров [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 3 (46). – С. 144–159.

16. Khaletskiy, Y. Acoustic response of a fan duct liner including porous material [Электронный документ] / Y. Khaletskiy, Y. Pochkin, A. Igolkin // 20th International Congress on Sound and Vibration 2013, ICSV 2013. – 2013. – P. 341–348.

17. Karstadt, S. Sound deadening on fans / S. Karstadt, B. Matyschok, P.F. Pelz // Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. – 2011. – Vol. 54679. – P. 961–971.

18. Peng, F. Sound absorption of a porous material with a perforated facing at high sound pressure levels / F. Peng // Journal of Sound and Vibration. – 2018. – Vol. 425. – P. 1–20.

19. Jones, M. Benchmark data for evaluation of aeroacoustic propagation codes with grazing flow / M. Jones, W. Watson, T. Parrott // 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2005. – P. 2853.

20. Ch. V., Surya Narayana Reddi. Simplified impedance models for Helmholtz resonator with intrusions / Ch. V., Surya Narayana Reddi, Chandramouli Padmanabhan // ICSV20. – Bangkok, Thailand, July 2013. – P. 158–161.

21. Farshidianfar, M.H. Mode count and modaldensity of acoustical cavities: bars, plates and cylindrical shells / M.H. Farshidianfar, A. Farshidianfar // ICSV20. – 2013. – P. 172–175.

22. Hynninen, A. Determination of in-duct sound power beyond the plane wave range using wall-mounted microphones / A. Hynninen, M. Åbom // Applied Acoustics. – 2015. – Vol. 99. – P. 24–30.

23. Localization of broadband acoustical sources in the cylindrical duct via measurements outside the duct end / K. Gao [et al.] // Journal of Sound and Vibration. – 2023. – P. 117749.

24. Modal deconvolution of baffled duct internal acoustics from external measurements and experimental evaluation / B. Etchebarne [et al.] // ICSV29-29th International Congress on Sound and Vibration. – 2023.

25. Laly, Z. An experimental transfer matrix method to characterize acoustic materials at high sound pressure levels in airflow environment / Z. Laly, X. Feng, N. Atalla // Applied Acoustics. – 2023. – Vol. 206. – P. 109311.

26. Шульдешов, Е.М. Материалы для звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей (обзор) / Е.М. Шульдешов, И.Д. Краев, Е.П. Образцова // Труды ВИАМ. – 2021. – № 7 (101). – С. 59–72.

27. Численное моделирование задачи устойчивости перфорированных оболочек / А.А. Антипов [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – №1. – С. 21–30.

28. Филиппенко, Г.В. Модальный анализ трубы, поврежденной водородом, как неоднородной по толщине оболочки / Г.В. Филиппенко, Т.В. Зиновьева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – № 3. – С. 170–182.

29. Исследование когерентности акустических полей высокочастотных шумовых источников в случайно-неоднородном океане / А.И. Хилько [и др.] // Акустический журнал. – 2018. – Т. 64, № 2. – С. 217–227.

30. Численное моделирование ступени центробежного компрессора газоперекачивающего агрегата в 2FSI-постановке / В.Я. Модорский [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника, 2019. – № 56. – С. 83–91.

31. Численное моделирование газодинамических и прочностных характеристик вентилятора для экспериментальной установки по исследованию разрушения льда на вращающихся рабочих лопатках / С.Л. Калюлин [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 1. – С. 134–141.

32. Численное моделирование процессов взаимовлияния волны возмущения в водороде и перегородки в модельном канале / В.Я. Модорский [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 6. – С. 68–77.

33. Численное моделирование процессов взаимовлияния волны газа и деформированной преграды в модельном канале авиационного двигателя / М.А. Серегина, А.В. Бабушкина, В.Я. Модорский, Д.С. Максимов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 69. – С. 92–99.

## References


1. Yakubson K. I. Prospects for the production and use of hydrogen as one of the directions for the development of a low-carbon economy in the Russian Federation (review). *Journal of Applied Chemistry,* 2020, vol. 93, no. 12, pp. 1675-1695.

2. Kolbantseva D. et al. Analysis of technologies for hydrogen consumption, transition and storage at operating thermal power plants. *Energies,* 2022, vol. 15, №. 10, p. 3671.

3. Marin G. E. et al. Simulation of the operation of a gas turbine installation of a thermal power plant with a hydrogen fuel production system. *International Journal of Hydrogen Energy,* 2023, vol. 48, no. 12, pp. 4543-4550.

4. Bayramov A. N. Comprehensive assessment of system efficiency and competitiveness of nuclear power plants in combination with hydrogen complex. *International Journal of Hydrogen Energy,* 2023, vol. 48, iss. 70, pp. 27068-27078.

5. Zvereva E. R. et al. Development of “green” hydrogen energy in the European part of the Russian Federation. *Economics of Industry / Russian Journal of Industrial Economics,* 2022, vol. 15, no. 2, pp. 167-176.

6. Ivanova E. E. et al. Analiz optimal′nykh sposobov transportirovki vodoroda [Analysis of optimum methods for transporting hydrogen]. *Science and technology: Prospects for development and application,* 2023, pp. 28-45.

7. Golub V.V., Ivanov K.V. Experimental study of diffusion seuton-ignition of hydrogen in a channel. *Chemical Physics,* 2009, vol. 28, no. 5, pp. 19-26.

8. Volodin V.V., Golub V.V., Elyanov A.E. Influence of acoustic vibrations on the speed of a cellular hydrogen-air flame in a horizontal channel. *Technical Physics Letters,* 2022, vol. 48, no. 9, p. 41.

9. Karasevich V., Valery B., Mingaleeva R. Perspektivy ispol′zovaniy prirodnogo gaza dly proizvodstva i ėksporta rossiiskogo vodoroda [Prospects for the use of natural gas for production and export of russian hydrogen]. *Energy Policy,* 2023, no. 6 (184), pp. 90-99.

10. Karasevich V. A., Rudenko S. Yu., Kortikov A. V. Tekushchee sostoiynie i potential ispol′zovaniiy prirodnogo gaza dly proizvodstva i ėksporta vodorodosoderzhashchei produktcii [Current state and potential of use of natural gas for production and export of hydrogen-containing products]. *Issues of economics and management of the oil and gas complex,* 2022, pp. 160-165.

11. Ismagilova V. S., Chekushina T. V. Transportation of pipeline and liquefied natural gas: comparative analysis of advantages and disadvantages. *Earth Sciences and Subsoil Use,* 2023, vol. 46, no. 1 (82). pp. 61-71.

12. Darsaliya N. M. Farukhshina R. R., Saddik Z. E. Transportation of hydrogen by main gas pipelines as a methane-hydrogen mixture. *Liquid and Gaseous Energy Resources,* 2023, vol. 3, iss. 1, 6 p.

13. Anoshkin A. N. et al. Raschetno-ėksperimental′nye issledovaniy rezonansnykh mnogosloinykh zvukopogloshchaiushchikh konstrukttcii [Calculation and experimental studies of resonant multilayer sound-absorbing structures]. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics,* 2015, no. 1, pp. 5-20.

14. Bielak G. W., Premo J. W., Hersh A. S. Advanced turbofan duct liner concepts, 1999, no. *NASA/CR*-1999-209002.

15. Zakharov A.G. et al. Akusticheskie rezonansnye kharakteristiki dvukh i trekhsloinykh sotovykh zvukopogloshchaushchikh panelei [Acoustic resonance characteristics of two- and three-layer cellular sound-absorbing panels]. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering,* 2016, no. 3 (46), pp. 144-159.

16. Khaletskiy Y., Pochkin Y., Igolkin A. Acoustic response of a fan duct liner including porous material. *20th International Congress on Sound and Vibration 2013, ICSV 2013,* 2013, pp. 341-348.

17. Karstadt S., Matyschok B., Pelz P. F. Sound deadening on fans. *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air,* 2011, vol. 54679, pp. 961-971.

18. Peg F. Sound absorption of a porous material with a perforated facing at high sound pressure levels. *Journal of Sound and Vibration,* 2018, vol. 425, pp. 1-20.

19. Jones M., Watson W., Parrott T. Benchmark data for evaluation of aeroacoustic propagation codes with grazing flow. *11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference,* 2005, p. 2853.

20. Ch. V. Surya Narayana Reddi, Chandramouli Padmanabhan. Simplified impedance models for Helmholtz resonator with intrusions. ICSV20. Bangkok. Thailand, July 2013, pp. 158–161.

21. Farshidianfar M. H., Farshidianfar A. Mode count and modal density of acoustical cavities: bars, plates and cylindrical shells. *ICSV20,* 2013, pp. 172-175.

22. Hynninen A., Abom M. Determination of in-duct sound power beyond the plane wave range using wall-mounted microphones. *Applied Acoustics,* 2015, vol. 99, pp. 24-30.

23. Gao K. et al. Localization of broadband acoustical sources in the cylindrical duct via measurements outside the duct end. *Journal of Sound and Vibration,* 2023, p. 117749.

24. Etchebarne B. et al. Modal deconvolution of baffled duct internal acoustics from external measurements and experimental evaluation. *ICSV29-29th International Congress on Sound and Vibration,* 2023.

25. Laly Z., Feng X., Atalla N. An experimental transfer matrix method to characterize acoustic materials at high sound pressure levels in airflow environment. *Applied Acoustics,* 2023, vol. 206, p. 109311.

26. Shuldeshov E. M., Kraev I. D., Obraztsova E. P. Materialy dlia zvukopogloshchaiushchikh konstruktsiĭ aviatsionnykh dvigateleĭ (obzor) [Materials for sound-absorbing structures of aircraft engines (review)]. *Proceedings of VIAM,* 2021, no. 7 (101), pp. 59-72.

27. Antipov A. A. et al. Chislennoe modelirovanie zadachi ustoĭchivosti perforirovannykh obolochek [Numerical modeling of the problem of stability of perforated shells]. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics,* 2015, no. 1, pp. 21-30.

28. Filippenko G.V., Zinovieva T.V. Modal′nyi analiz truby, povrezhdennoi vodorodom, kak neodnorodnoi po tolshchine obolochki [Modal analysis of a pipe damaged by hydrogen as a heterogeneous shell thickness]. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics,* 2022, no. 3, pp. 170-182.

29. Hilko A.I. et al. Issledovanie kogerentnosti akusticheskikh polei vysokochastotnykh shumovykh istochnikov v sluchaĭnoneodnorodnom okeane [Investigation of the coherence of acoustic fields of high-frequency noise sources in a randomly inhomogeneous ocean]. *Acoustic,* 2018, vol. 64, no. 2, pp. 217-227.

30. Modorsky V.Ya. et al. Chislennoe modelirovanie stupeni tsentrobezhnogo kompressora gazoperekachivaiushchego agregata v 2FSI-postanovke [Numerical modeling of the centrifugal compressor stage of a gas pumping unit in 2FSI- production]. *Bulletin of PNIPU. Aerospace technology,* 2019, no. 56, pp. 83-91.

31. Kalyulin S. L. et al. Chislennoe modelirovanie gazodinamicheskikh i prochnostnykh kharakteristik ventiliatora dlia ėksperimental′noi ustanovki po issledovaniiu razrusheniia l′da na vrashchaiushchikhsia rabochikh lopatkakh [Numerical simulation of gas dynamic and strength characteristics of a fan for an experimental installation for studying ice destruction on rotating working blades]. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics,* 2023, no. 1, pp. 134-141.

32. Modorsky V. Ya. et al. Chislennoe modelirovanie protsessov vzaimovliianiia volny vozmushcheniia v vodorode i peregorodki v model′nom kanale [Numerical simulation of the processes of interaction between a perturbation wave in hydrogen and a partition in a model channel]. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics,* 2023, no. 6, pp. 68-77.

33. Seregina M. A. et al. Chislennoe modelirovanie protsessov vzaimovliianiia volny gaza i deformirovannoi pregrady v model′nom kanale aviatsionnogo dvigatelia [Numerical simulation of the processes of interaction of a gas wave and a deformed obstacle in a model channel of an aircraft engine]. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering,* 2022, no. 69, pp. 92-99.

**Финансирование.** Работа выполнена при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2023-0004) «Водородная энергетика. Материалы и технология хранения, транспортировки и применения водорода и водородсодержащих смесей». Расчеты выполнены при использовании оборудования ЦКП ЦВВС ПНИПУ.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов равноценен.**

**Funding.** The work was carried out in fulfillment of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for fundamental scientific research (project FSNM-2023-0004) "Hydrogen energy. Materials and technology for storing, transporting and using hydrogen and hydrogen-containing mixtures." Calculations were performed using the equipment of the Central Collective Use Center of the Central Hydrogen-Containing Mixtures of PNIPU.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**The contribution of the authors is equivalent.**